

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Ochrana patní části svahů dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně při kolísání hladiny v nádrži
Protection of Slope Foothill of Lower Reservoir of Pumping Hydroelectric Power Station
Dlouhé Stráně during Reservoir Water Stage Fluctuation

Student:

Bc. Markéta Kičmerová

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Nad'a Rapantová, CSc.

Ostrava 2017

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Markéta Kičmerová**
Studijní program: N3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3607T035 Geotechnika
Téma: **Ochrana patní části svahů dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně při kolísání hladiny v nádrži**
Protection of Slope Foothill of Lower Reservoir of Pumping Hydroelectric Power Station Dlouhé Stráně during Reservoir Water Stage Fluctuation

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod, definice problému
2. Přírodní podmínky lokality (geologické, hydrologické, klimatické)
3. Rekognoskace poškození břehové linie dolní nádrže PVE erozí
4. Popis mechanismu eroze patní části svahů
5. Návrh sanace a protierozních opatření vybraného kritického úseku s využitím stabilitních výpočtů
6. Diskuze a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně: Historie a výstavba.*, ČEZ a.s., 1998.
Hájovský J. *Přečerpávací vodní elektrárna dlouhé stráně - břehové pásmo dolní nádrže: Kritická analýza současného stavu*, Odborná zpráva, 2011, Archiv SG-Geoinženýring s.r.o.
kol. *Dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně – Geotechnické posouzení stability břehového pásma*, 2011, Archiv SG-Geotechnika, a.s. Praha.
kol. *PVE Dlouhé Stráně – sanace poškozeného okolí sdruženého objektu*, 2001, Archiv SG-Geoinženýring, s.r.o. Ostrava.
kol. *PVE Dlouhé Stráně – návrh sanace porušeného břehového pásma, I a II. etapa*, 2002, Archiv SG-Geoinženýring, s.r.o. Ostrava.
kol. *PVE Dlouhé Stráně – stabilizační opatření sesuvu levého břehu dolní nádrže*, 2002, Archiv SG-Geoinženýring, s.r.o. Ostrava.
kol. *Studie k problematice stabilizace břehového pásma (levý svah u sdruženého objektu)*, 2003, Archiv SG-Geotechnika, a.s. Praha.
kol. *Stabilita levého břehového pásma PVE DS v prostoru sdruženého objektu*, 2006, Archiv SG-Geoinženýring, s.r.o. Ostrava.
kol. *Studie Geotechnické posouzení stability výlomové stěny za sdruženým objektem*, 2007, Archiv SG-Geoinženýring, s.r.o. Ostrava.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Nad'a Rapantová, CSc.**

Datum zadání: 28.02.2017

Datum odevzdání: 30.11.2017



doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

„Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.“

V Ostravě 27.11.2017



.....
podpis studenta

Prohlašuji:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домии, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домии, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 27.11.2017

Anotace

KIČMEROVÁ, Markéta. Ochrana patní části svahů dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně při kolísání hladiny v nádrži. Ostrava: VŠB-TUO, 2017. 93 s.

Diplomová práce se zaměřuje na problematiku ochrany patní části svahů dolní nádrže přečerpávací vodní elektrárny Dlouhé Stráně v pohoří Hrubý Jeseník. Konkrétně se zabývá erozí břehových linií vlivem kolísání hladiny vody v nádrži v důsledku opakovaného napouštění a vypouštění a navrhuje konkrétní variantu sanace a protierozních opatření pro narušené svahy s využitím stabilitních výpočtů v programu Plaxis 2D. V závěru je diskutována efektivnost a vhodnost použití varianty pro dané vodní dílo vzhledem ke složitým přírodním a technickým podmínkám.

Klíčová slova: vodní nádrž, eroze svahů, kolísání hladiny vody, sanace, protierozní opatření

Abstract

KIČMEROVÁ, Markéta. Protection of Slope Foothill of Lower Reservoir of Pumping Hydroelectric Power Station Dlouhé Stráně during Reservoir Water Stage Fluctuation. Ostrava: VŠB-TUO, 2017. 93 p.

This Diploma thesis focuses on the issue of protection of slope foothill of lower reservoir of pumping hydroelectric power station Dlouhé Stráně in Hrubý Jeseník mountains. Specifically, it deals with shoreline erosion, which is caused by reservoir water stage fluctuation due to filling and emptying and suggests specific method of rehabilitation and anti-erosion measures for disturbed slopes using stability calculations in Plaxis 2D program. At the end, the effectiveness and suitability of the method used for given water construction is discussed considering the complex natural and technical conditions.

Keywords: reservoir, slopes erosion, water stage fluctuation, rehabilitation, anti-erosion measures

Obsah

Seznam použitého značení	9
Seznam parametrů	9
Seznam zkratk	9
1. Úvod, definice problému	10
2. Cíle a metodika práce	12
Cíle práce.....	12
Metodika práce	12
3. Přírodní poměry lokality	14
3.1. Geologické poměry.....	14
3.2. Morfologické poměry	21
3.3. Hydrologické a hydrogeologické poměry	21
3.4. Klimatické poměry	23
4. Rekognoskace poškození břehové linie dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně erozí	25
4.1. Technické řešení dolní nádrže	25
4.2. Vývoj eroze břehových pásem dolní nádrže.....	27
4.3. Rekognoskace aktuálního stavu.....	30
4.3.1. Pravé břehové pásmo	33
4.3.2. Levé břehové pásmo.....	37
5. Výsledky laboratorních zkoušek odebraných vzorků	44
5.1. Dokumentace a zatřídění odebraných úlomků hornin	44
5.2. Nasákavost přírodního kamene vodou za atmosférického tlaku	48
5.3. Mrazuvzdornost přírodního kamene.....	50
5.4. Pevnost přírodního kamene v prostém tlaku	54
5.5. Sítový rozbor	58
6. Návrh sanace a protierozních opatření vybraného kritického úseku s využitím stabilitních výpočtů	61

6.1. Model stávajícího stavu	62
6.2. Návrh sanace a protierozních opatření	66
7. Diskuze a závěr	80
Seznam použitých pramenů	85
Odborná literatura	85
Internetové zdroje.....	85
Jiné zdroje	86
Normy.....	86
Elektronické zdroje	87
Seznam fotografií	88
Seznam grafů.....	90
Seznam obrázků	91
Seznam tabulek	93

Seznam použitého značení

Seznam parametrů

A_b	nasákavost vodou za atmosférického tlaku [%]
m_s	hmotnost vysušeného zkušebního vzorku [g]
m_d	hmotnost nasyceného zkušebního vzorku [g]
R	pevnost zkušebního tělesa v prostém tlaku [MPa]
F	je zatížení při porušení [kN]
A	je plocha příčného průřezu zkušebního tělesa [mm ²]
l	aritmetické průměry délek v horizontálním směru [mm]
h	výška zkušebního tělesa [mm]
k_x, k_y	koeficienty hydraulické vodivosti [m/s]
γ	objemová tíha [kN/m ³]
E_{def}	modul přetvoření [MPa]
E	modul pružnosti [MPa]
ν	poissonovo číslo [-]
c	soudržnost [kPa]
φ	úhel vnitřního tření [°]
τ_{rel}	čerpání pevnosti [%]
u	posun [m]
σ	napětí [kN/m ² , kPa]
EA	tuhost prvku v tlaku a tahu [kN/m]

Seznam zkratek

CHKO	chráněná krajinná oblast
PVE	přečerpávací vodní elektrárna
SEZ o TBD	souhrnná etapová zpráva o technickobezpečnostním dohledu
VŠB-TUO	Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
ČÚZK	Český úřad zeměměřičský a katastrální
SO	sdružený objekt

1. Úvod, definice problému

Tato diplomová práce se zabývá problematikou zpevňování břehů vodních děl, zvláště pak při kolísání výšky hladiny vody v nich. Konkrétně se zaměřuje na hodnocení eroze patní části svahů dolní nádrže přečerpávací vodní elektrárny (dále PVE) Dlouhé Stráně. Dolní nádrž PVE Dlouhé Stráně se nachází v pohoří Hrubý Jeseník v nadmořské výšce 824,70 m n. m. v koruně hráze v náročných klimatických podmínkách.

V rámci detailní analýzy s využitím numerického modelování bude nejdříve provedeno posouzení aktuálního stavu vybrané části svahu a následně navrhnutá varianta sanace a protierozních opatření, o jejichž efektivitě a vhodnosti využití pro dané vodní dílo bude diskutováno v závěru práce.

O možnosti výstavby PVE velkého výkonu na území České republiky bylo uvažováno již od roku 1957, kdy byly dokonce započaty i studijní práce zaměřené na výběr vhodné lokality. Ty byly spolu se základním geologickým průzkumem (v letech 1963 až 1966) a zhruba 40 variantami technického řešení publikovány v souhrnné studii vydané v roce 1967. Hlavními technickými požadavky byly dostatečně velký prostor pro vybudování nádrží, umístění dolní nádrže na přirozeném toku při dosažení požadovaného energetického spádu, poměr horizontální vzdálenosti nádrží ke spádu v rozmezí hodnot 2 – 3 a možnost instalace výkonů nad 500 MW s denní akumulací. Všechny zvažované lokality, které vyhovovaly těmto kritériím, byly situovány v pohoří Hrubý Jeseník. [1]

Počátek výstavby PVE Dlouhé Stráně je datován na 11. 5. 1978 s definitivním ukončením výstavby a uvedením do provozu dne 31. 12. 1996. Pro její umístění byla vybrána oblast pohoří Hrubý Jeseník se zázemím v přílehlé obci Loučná nad Desnou. Oblast je charakteristická zejména horským prostředím, rozsáhlou lesnatostí, menším rozsahem průmyslu a rekreačním osídlením. Spojení s okolím je kromě silničních komunikací zajištěno železniční tratí přes město Šumperk. [1]

Za zmínku stojí způsob realizace přivaděčů, které byly ve formě ocelového potrubí umístěny do dvou ražených tunelů. Důvodem pro toto řešení byla jak snaha co nejméně narušit ráz okolní krajiny, tak eliminace rizika zamrznutí vody v zimních měsících. [1]

Stavba celého díla byla rozdělena na dvě etapy a během celkových 18 let výstavby se bylo nutno vyrovnat s mnoha problémy, které vyústily v nutné změny oproti původní koncepci díla. Tento vývoj výstavby se sice negativně podepsal na její délce, ovšem z

hlediska technického řešení a provedení došlo k výraznému zlepšení, kdy bylo dokončené dílo při porovnání s obdobnými stavbami v zahraničí na srovnatelné či lepší úrovni. [1]

Z hlediska definice problému poškození břehových pásem je třeba zdůraznit několik faktorů, které mají na nynější stav stěn dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně vliv. Jedná se především o umístění PVE, kde i nižší uložení dolní nádrže představuje problém z hlediska klimatických podmínek. Svahy jsou totiž podrobeny nejen namáhání způsobeného kolísáním hladiny vody v nádrži, ale také jejich namrzáním a rozmrzáním v rozsahu průměrně 140 až 160 dnů za kalendářní rok. Tyto jevy mají vliv zejména na další porušování horninového masivu svahů diskontinuitami a zvětrávacími procesy bloků skalních hornin, čímž dochází ke snížení pevnosti a stability svahů.

Dalším faktorem jsou geologické podmínky v místě PVE Dlouhé Stráně, kde se nachází pásma biotitové ruly a amfibolitu, jejichž pevnost je natolik vyhovující, že na velké části svahů nebylo v původním projektu realizováno další zajištění. To se ovšem časem ukázalo jako nevhodné řešení, jelikož vlivem kolísání hladiny vody v nádrži a cyklů namrzání a rozmrzání nezajištěných svahů dochází k již zmíněnému porušování. Za zmínku stojí řešení oblasti vedle příjezdu k hrázi, kde byly od začátku instalovány gabionové matrace a která nevykazuje větší známky porušení od své instalace před 20 lety. Oproti tomu u nezajištěných svahů dochází k zvětrávacím procesům a sesuvům porušených částí do tělesa dolní nádrže. To působí problémy jak z hlediska zanášení dna nádrže a ve větším měřítku ke snižování jejího objemu, tak z hlediska eroze svahu pravého břehového pásma směrem k přilehlé silniční komunikaci vedoucí k horní nádrži. Vzhledem k tomu, že se jedná o jediný přístup k horní nádrži jak pro její obsluhu, tak pro veřejnost, začíná být tento stav závažným problémem, který bude potřeba řešit.

2. Cíle a metodika práce

Cíle práce

Diplomová práce se zaměřuje primárně na popis problematiky zpevnování břehů vodních děl s důrazem na vliv kolísání hladiny vody v nich. Umístění PVE Dlouhé Stráně v pohoří Hrubý Jeseník pak dále vodní dílo ovlivňuje jak z hlediska technického řešení umístěním v CHKO Jeseníky, tak z hlediska přírodních podmínek, kdy je třeba se vyrovnat se složitými klimatickými poměry v lokalitě.

Jedním z cílů diplomové práce je z dostupných dokumentů vytvořit rešerši průběhu porušování břehových pásem v dlouhodobějším měřítku s důrazem na aktuální stav, který je doložen pořízenou fotodokumentací autora z rekognoskace břehových pásem z května a srpna roku 2017. Důležitost rešerše spočívá také ve vyhodnocení již provedených opatření na svazích břehů dolní nádrže a využití těchto poznatků při novém návrhu.

Dalším z cílů práce je výpočet stability stávajícího svahu, kde pro větší přesnost vstupních dat zadávaného horninového masivu ve stabilitních výpočtech byly odebrány vzorky hornin. Tyto vzorky byly vybrány ze svahů narušeného úseku levého břehového pásma dolní nádrže za sdruženým objektem a podrobeny laboratorním zkouškám na nasákavost, mrazuvzdornost a pevnost v tlaku. Od záměru provedení laboratorní zkoušky na propustnost bylo nakonec upuštěno kvůli obtížnosti získání vzorků, které by bylo nutno vyvrtat na místě uložení z velkých kusů hornin. Z odebraného vzorku povrchové vrstvy sutí byl také proveden síťový rozbor.

Posledním z cílů pak je stanovení opatření pro vybraný úsek porušeného svahu na levém břehu dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně za sdruženým objektem. Toto opatření je aplikováno na svah o parametrech zemin vycházejících z laboratorních zkoušek a následně je posuzována stabilita takto sanovaného svahu.

Metodika práce

Odebrané vzorky hornin byly očištěny, zatříděny a nařezány pro potřeby dalších zkoušek na krychle o rozměrech 50x50x50 mm se stejnoměrným zastoupením obou vyskytujících se hornin v lokalitě dolní nádrže, a to biotitické ruly a amfibolitu. Následně byla provedena zkouška nasákavosti a poté byly vzorky vloženy na 60 dní do mrazícího boxu pro

provedení zkoušky mrazuvzdornosti. Tato délka odpovídá 120 cyklům namrzání a rozmrzání vzorků. Poté byly vzorky podrobeny zkoušce pevnosti v tlaku, kdy byly posuzovány vzorky nenarušené mrazovými cykly, vzorky odebrané po polovině cyklů (tedy po 60 cyklech) a vzorky po dokončení všech cyklů (tedy po 120 cyklech). Vzorek povrchové vrstvy suti byl vysušen a podroben zkoušce síťového rozboru.

Stávající svah i konkrétní návrh sanace a protierozních opatření jsou posuzovány s využitím 2D modelování stabilitních výpočtů v programu Plaxis 2D. Kolísání hladiny vody v nádrži je uvažováno na maximální využitelný objem s 24 hodinovým cyklem, tedy postupné napouštění dolní nádrže od ranních hodin až do maximální hladiny s následným přečerpáváním vody do horní nádrže v nočních hodinách. Provozní kolísání hladiny vody v nádrži je uvažováno v rozmezí od 800,50 m n. m. do 822,70 m n. m., tedy celkově 22,20 m.

3. Přírodní poměry lokality

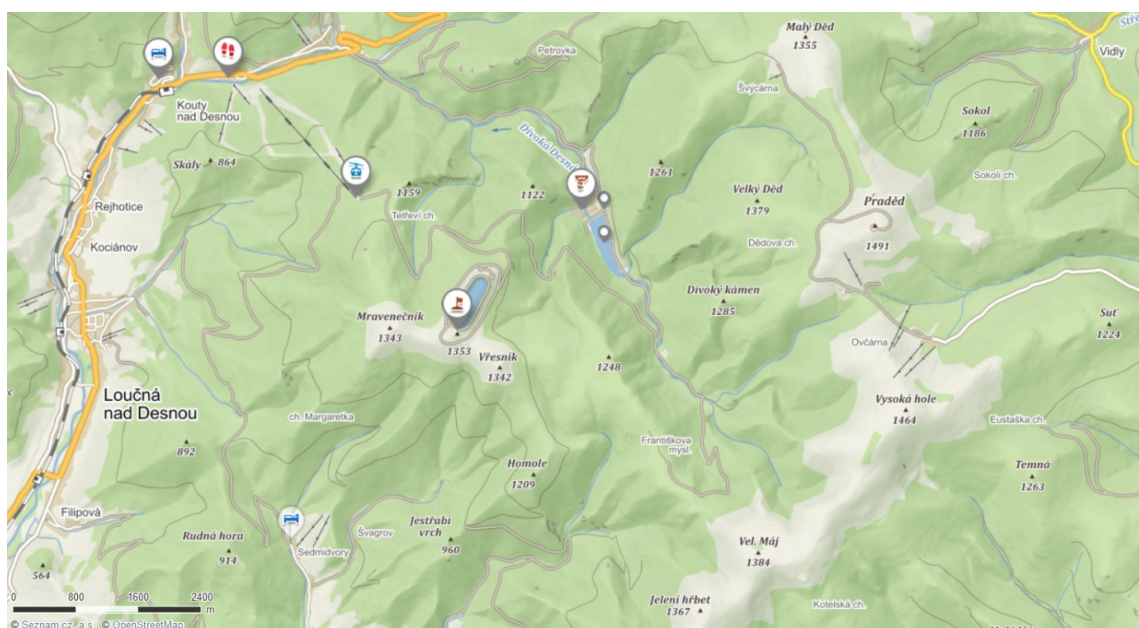
Zájmové území PVE Dlouhé Stráně se nachází v oblasti CHKO Jeseníky v pohoří Hrubý Jeseník, konkrétně pak v katastrálním území Rejhotice obce Loučná nad Desnou v okrese Šumperk. Umístění stavby právě v CHKO mělo výrazný vliv nejen na návrh podoby díla, ale i na způsob jeho provedení.

Jako zajímavost bych zmínila, že vybudování PVE Dlouhé Stráně obnášelo podzemní razící práce v rozsahu cca 290 000 m³ horniny v rostlém stavu a závěry geologického průzkumu, byly většinou potvrzeny při realizaci díla. [1]

Geologická situace zájmové oblasti byla zpracována a stručně citována z odborné literatury ČEZ a.s. (1998) [1], Chlupáč a kol. (2002) [2], Krásný (2012) [3], Misař a kol. (1983) [4], Quitt (1971) [5] a internetových zdrojů Správy CHKO Jeseníky [7], Institutu geologického inženýrství Hornicko-geologické fakulty VŠB-TUO [8] a České geologické služby [9].

3.1. Geologické poměry

Z geologického hlediska se celé území PVE Dlouhé Stráně řadí k Pradědské hornatině v Hrubém Jeseníku. Zájmová oblast je ohraničena hřebeny ze všech směrů kromě západní až severozápadní strany, kde je volně otevřena směrem k údolí. Pro lepší představu přikládám následující Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Situace umístění PVE Dlouhé Stráně [6]

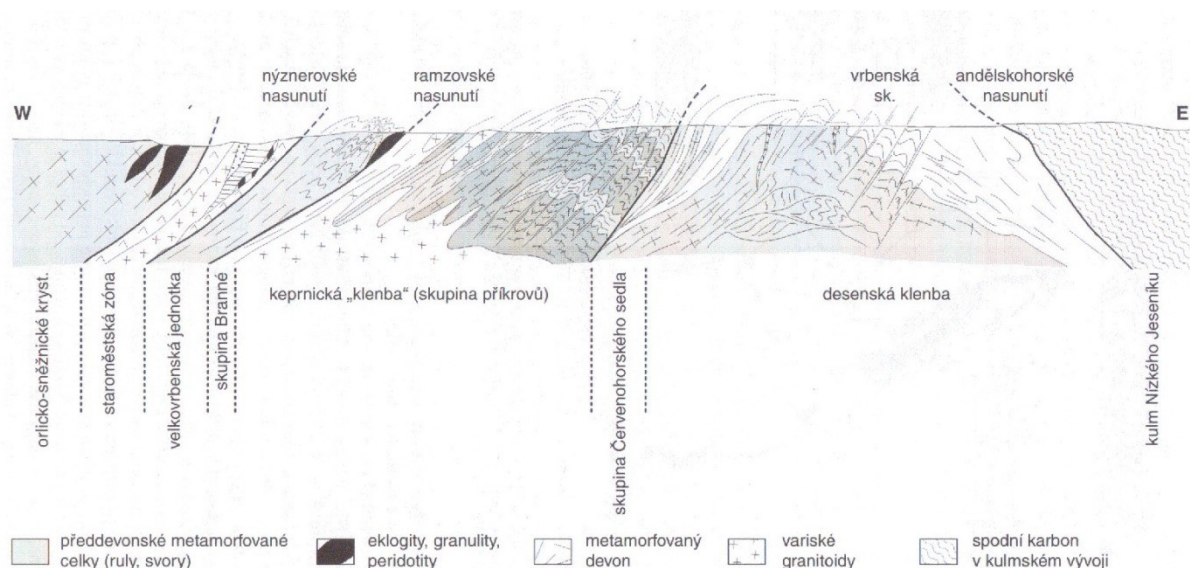
Obecně se pohybujeme v severní části moravsko-slezské zóny, v oblasti východosudetské jednotky (silesika). Ta je na severozápadě ohraničena ramzovskou a nýznerovskou tektonickou linií, které ji oddělují od západních Sudet (lugika). Na východě je ohraničena předělem mezi Hrubým a Nízkým Jeseníkem, kde lze pozorovat nejen změnu facie nejsvrchnějšího devonu, ale také metamorfního stupně a tektonického stylu. Jižní okraj tvoří systém zlomů (bušínský zlom a zlomové pásmo Hané).

Geologická stavba Hrubého Jeseníku je charakteristická pseudoklenbovitou kernou stavbou s keprnickou a desenskou klenbou, které mají krystalická jádra a mladší obal. Jádro se vyznačuje složitou strukturou porušených synklinorií a antiklinorií se soustavami podélných a příčných dislokací. Vlastní klenbovitou stavbu pak vytvořily nejmladší tektonické pohyby na příčných poruchách společně s již existujícími podélnými zlomy severovýchodního a jihozápadního směru. Zatímco tektonické pohyby způsobily vysunutí jádra pohoří a nadzvednutí obalové série při okrajích, existující zlomy dovolily pohyby ker zcela nezávisle na širším okolí. Za zmínku stojí nejmladší saxonské pohyby, které proběhly podél sudetského směru (tj. směr SZ-JV).

V širším rozsahu je geologická stavba kolem PVE Dlouhé Stráně v rámci CHKO Jeseníky tvořena několika nižšími geologickými jednotkami silesika, mezi které patří:

- **keprnická klenba**, která je ohraničena na Z ramzovskou linií, na V zónou Černohorského sedla a na S a J omezena tektonicky; složena je z mezozonálně metamorfovaných hornin (biotitické ruly, staurolitické svory, migmatity a ortoruly) s faciálně pestrými zbytky nejspíše varisky přeměněného brunovistulika (krystalické vápence, erlány, křemence, amfibolity a amfibolicko-biotitické ruly),
- **zóna Branné**, která kopíruje Z keprnické klenby až do podloží ramzovské linie; tvoří ji epizonálně přeměněné horniny až devonského stáří, které lze dále rozdělit na spodní tvořící devonský plášť keprnické klenby (fylity se složkami vápenců, laminované křemence a původně drobové horniny), na střední kvarcitový (křemence a čisté krystalické vápence) a nakonec na svrchní (chlorititické a aktinolitické břidlice, amfibolity, drobové břidlice, kvarcity a kvarcitový konglomerát),
- **desenská klenba** tvořící celou východní část pohoří Hrubý Jeseník; mladé příčné poruchy ji dělí na několik menších částí, které jsou seskupeny ve 2 větších krách, jejichž hranici pak tvoří bělský zlom; její předdevonské jádro tvoří přepracované horniny brunovistulika (slabě migmatizované biotitické a dvojslídne ruly); na V a Z je ohraničena devonskými horninami vrbenské skupiny (s metamorfní zónou od chloritové až do sillimanitové), na J leží pradělská kra a na S pak kra orlická,

- **pásmo vrbenské skupiny** tvořící plášť jaderného krystalinika desenské klenby se vyskytuje od V Hrubého Jeseníku k J a od S se stáčí na Z, kde je ohraničeno ondřejovickým zlomem od rejvízské oblasti; je tvořeno silně přeměněnými sedimenty a vulkanity až staropaleozoického stáří (slepence přecházející v kvarcity, fylity s vložkami eruptiv intruzivní a efusivní povahy, drobné krystalické vápence s fylity a také železné rudy typu Lahn-Dill),
- **rejvízská oblast** je pokračováním zóny Černohorského sedla za běským zlomem; je tvořena předdevonským podkladem (biotitické pararuly) a devonským pláštěm (kvarcity a granáticko-staurolitické svory),
- **andělskohorské souvrství** je prvním souvrstvím Nízkého Jeseníku z flyšového vývoje; je tvořeno rytmickým střídáním břidlic a středně zrnitých drob s místním zastoupením skluzových slepenců, nadloží pak tvoří vrbenský devon; směrem k V dochází ke značnému vyklínění tohoto souvrství,
- **zóna Červenohorského sedla** ležící mezi jády keprnické a desenské klenby; je charakteristická šupinovou stavbou pruhově střídající pásy metamorfovaného pláště s předdevonskými krystaliniky a tvoří ji převážně metakvarcity a svory; na S mění v jesenický amfibolitový masiv (devon) a na J v sobotínský amfibolitový masiv,
- **jesenický amfibolitový masiv** je složitým prstovitým tělesem tvořeným metamorfovanými bazickými vulkanity s menším zastoupením intruzivních hornin (gabery, gabrodiority až diority) a tufovými a tufitickými horninami, které se mění v páskované amfibolity, amfiboliticko-erlánové stromatity a aktinolitické břidlice,
- **sobotínský amfibolitový masiv** se vyskytuje zejména u Sobotína s výběžky na J a S, kde zasahuje až do jižní části pradědské kry a zóny Černohorského sedla; je tvořen středo- až hrubo- zrnitými amfibolity, amfibolitickými rulami a metadiority, chloriticko-aktinolitickými břidlicemi, mastkovými břidlicemi, aktinolitovci, serpentinity a krupníky,
- **žulovský masiv** (pluton), který je největším intruzivním tělesem v sileziku a tvoří Žulovskou pahorkatinu severně od keprnické klenby; vznikl řadou intruzí od starších amfibolicko-biotitických dioritů a granodioritů přes biotitický granit až ke granodioritům s velkým obsahem křemene; je charakteristický alkalicko-vápenatým chemismem, korovým tavením a blastézou andalusitu a sillimanitu; hraničí s okolními jadernými částmi keprnické klenby a zóny Branné.



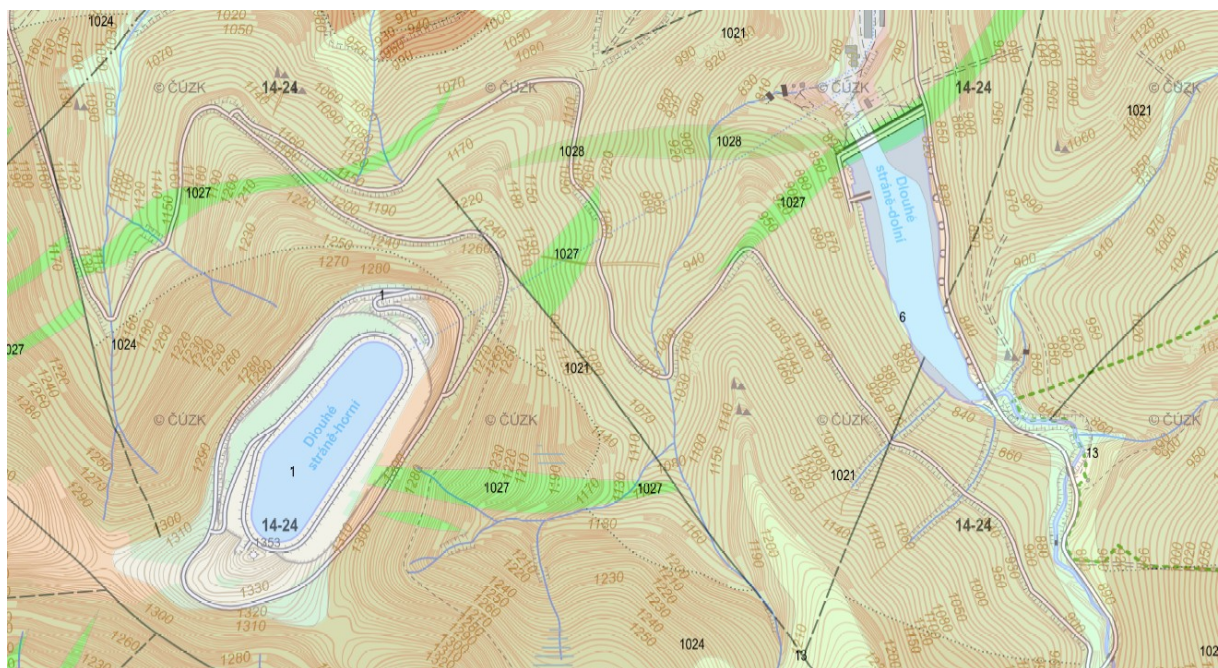
Obr. 3.2: Schéma geologického profilu pohoří Hrubý Jeseník [2]

Zájmová oblast PVE Dlouhé Stráně pak konkrétně patří do jižní části pradědské kry desenské klenby, která je na severovýchodě ohraničena příčným bělským zlomem od orlické kry a na jihozápadě pak klepáčovským zlomem.

Na následující geologické mapě oblasti jde vidět zastoupení hornin v lokalitě PVE Dlouhé Stráně. Jedná se o metamorfované horniny, které se řadí do regionu silezika, jednotky desenské skupiny a etarému proterozoika. Dle následujícího Obr. 3.3 je jejich výskyt následující:

- 1021 – fylonitizovaná biotit-chlorit-muskovitická rula,
- 1024 – biotitická a muskovit biotitická rula (drobová, hustá),
- 1027 – amfibolit,
- 1028 – amfibolická rula, amfibol-biotitická rula.

Tektonické linie zjištěných zlomů jsou pak na následujícím Obr. 3.3 znázorněny plnou čarou. Břehová pásma horní nádrže jsou tvořeny nivními sedimenty na levé straně a přechody kamenitých až hlinito-kamenitých sedimentů do hlinito-kamenitých, balvanitých až blokových sedimentů na pravé straně. Břehová pásma dolní nádrže jsou pak tvořena hlinito-kamenitými, balvanitými až blokovými sedimenty s výskytem slatiny, rašeliny a hnílokalu na dně nádrže.



Obr. 3.3: Geologická mapa lokality PVE Dlouhé Stráně [9]

Z hlediska tektoniky lze považovat za hlavní směr tektonických prvků, pásem a dislokací směr SV-JZ, který je výsledkem variské orogeneze při tvorbě silezika. Další tektonické projevy území pouze příčně rozdělily na jednotlivé denudované bloky. Model povrchu je následkem zejména saxonského vrásnění. Nejvýznamnější ramzovské tektonické pásmo probíhá po obou stranách ramzové linie na rozhraní keprnické a desenské klenby, čímž vytváří problematickou oblast s výskytem tektonických šupin směrem k V a zaklíněných synklinál.

Oblast je kombinací vrásové a kerné stavby s hlavní tektonickou linií v sudetském a krušnohorském směru SV-JZ. Novější významné linie S-J a V-Z pak s nimi svírají kosý úhel, čímž došlo k přerušení těchto tektonických linií a vzniku ker v horninovém masivu. Tektonické poruchy mocnějšího charakteru se ve svých krácích vyvíjejí průběžně a následně končí na tektonické poruše jiného směru. Při vertikálním posunu ovšem mohou pokračovat i v sousední kře. Jejich směr a sklon také závisí na pozici ve vrásové stavbě, kdy generálním úklonem vrás je SSZ a za generální směr vrásových os je považován směr VSV-ZJZ. Místy můžeme také narazit na dílčí zprohýbání, která se ve většině případů následně stáčí do linie V-Z.

Významným zlomem v lokalitě z hlediska kontinuity masivu je desenský zlom spolu s několika dalšími souběžnými zlomy. Základní horninou vyskytující se v desenském zlomu je desenská rula. Předkvartérní podklad tvoří biotitická pararula slabě až silně migmatizovaná

s lokálními výskyty amfibolitu, pegmatitu a svorové ruly v hlubších polohách. V oblasti se zpravidla vyskytují tyto typy hornin:

- **jemnozrnná biotitická rula** světle až tmavě šedého zbarvení s nafialovělým odstínem v čerstvém stavu a akcesoriemi granátu, apatitu, zirkonu, turmalínu a magnetitu (oblast mezi Mravenečníkem a Hladovým potokem),
- **hrubozrnná biotitická rula** až hrubě zrnitá připomínající migmatity, avšak od předchozí je více provrásněná (severozápadně od linie Mravenečník-Hladový potok až ke styku jádra klenby s obalovou sérií Červenohorského sedla),
- **jemnozrnná svorová rula** světle šedého zbarvení s výrazným až zlatožlutým leskem, silný obsah slídy, dále také výskyt granátu a staurolitu (úzký pruh na přesmyku mezi jádrem klenby a obalovou sérií Červenohorského sedla),
- **křemitá biotitická rula** světlého modrošedého zbarvení s kostkovitým rozpadem, která je tvořena křemenem, biotitem a plagioklasem (střed jádra klenby v Mravenečníku) – páskovaná tvrdá rula se střídajícími se vrstvami křemenných a polyminerálních partií, v místech zvýšeného obsahu magnetitu se dokonce mění z horniny na rudu (závěr údolí Divoké Desné na Zámčisku),
- **jemnozrnné amfibolity** tmavě zeleného až černozeleňého zbarvení, zpravidla usměrněné a s malou břidličnatostí, které tvoří ložní žíly mocné i několik metrů,
- **hrubozrnné amfibolity** zelenohnědého zbarvení s jemnozrnnou základní hmotou a vyrostlicemi amfibolitů a živců,
- **orthoruly** složené z křemene, orthoklasu a muskovitu, které se formují do ložních žil rul nebo do ojedinelých vložek,
- **pegmatity** světle hnědého nebo šedobílého zbarvení s velmi hrubozrnnou strukturou, vyskytují se ve formě protáhlých čoček a ložních žil mocných i 5 m, často se v nich také vyskytují shluky turmalínu.

Při realizaci geologického průzkumu v letech 1966 až 1971 bylo v zájmovém území PVE Dlouhé stráně nově vyraženo celkem 5 štol pro zjištění podmínek v oblasti horní nádrže, dolní nádrže a kaverny. Konkrétně se jednalo o tyto štoly:

- štola Š1 v délce 83 m v přehradním profilu u Hladové chaty (mechanika hornin),
- štola Š2 v délce 316 m v přehradním profilu u Jezerní chaty (mechanika hornin),
- štola Š3 v délce 91 m v místě sdruženého objektu (geologicko-tektonická stavba a zkoušky hornin),

- štola Š4 v délce 380 m v místě kabelové štoly (geologicko-tektonické poměry a fyzikálně-mechanické vlastnosti hornin v oblasti podzemní části elektrárny a komunikačního tunelu),
- štola Š5 v délce 170 m v nalezišti Zámčisko (množství a kvalita zásob kameniva pro násyp tělesa dolní nádrže).

Celkem bylo v rámci geologického průzkumu vyraženo 1155 m chodbic a štol, dále bylo vyvrtáno 1414 m povrchových a 1181 m podzemních vrtů a bylo vykopáno 241 šachtic a sond. Na následujícím Obr. 3.4 lze vidět naměřené hodnoty modulů pružnosti a deformace.

Štola	Druh zkoušky	Směr k foliaci	Obor zatížení	Modul přetvárnosti	Modul pružnosti	
			[MPa]	[MPa]	statický	dynamický
Š 1	zatěžovací, vodorovné	// s foliací	6	5 100	-	-
	zatěžovací, vodorovné	⊥ k foliaci	6	6 150	-	-
	zatěžovací, svislé	// s foliací	5	9 800	-	-
	deformetrická sonda		0,6	2 530	3 370	-
	mikroseismická		-	-	-	36 000
	laboratorní	// s foliací	20	26 100	36 100	-
	laboratorní	⊥ k foliaci	20	17 200	28 800	-
Š 2	zatěžovací	// s foliací	4	18 000	28 000	-
	zatěžovací	⊥ k foliaci	5,3	2 800	-	60 000
	mikroseismická	pevná hornina	-	-	-	3 700
	mikroseismická	porušená hornina	-	-	-	63 000
	laboratorní	// s foliací	20	56 500	62 000	54 000
	laboratorní	⊥ k foliaci	20	42 500	58 000	-
	radiální lis		5,4	19 000	27 700	-
	plochý lis	⊥ k foliaci	8	49 000	49 000	-

Obr. 3.4: Naměřené hodnoty modulů pružnosti a deformace [1]

Za zmínku stojí, že průzkumem zjištěné vlastnosti hornin se již dále neověřovaly dalšími tunelářskými díly. Jedinými výjimkami byl úsek komunikačního tunelu ve staničení cca 75 m a levá část břehu za sdruženým objektem, kde bylo lokalizováno značné oslabení masivu kvůli blízkosti desenského zlomu, což se projevovalo zejména zvýšeným navětráním a rozpukáním horniny. V obou případech se situace řešila předvrtáváním vrtů v délce 10 až 15 m. Přes poměrně složitou geologickou stavbu lokality probíhaly ražby tunelů vždy plným profilem. Při ražbách také nastaly celkem 3 závažné poruchy, a to zával v komunikačním tunelu v rozsahu cca 100 m³, vypadnutí části klenby kaverny v rozsahu cca 200 m³ a vtoky rozvolněného zvodnělého materiálu do tunelu po 2 dny vlivem široké tektonické poruchy.

3.2. Morfologické poměry

Výsledný tvar pohoří Hrubý Jeseník byl silně ovlivněn exogenními a endogenními procesy v mladším terciéru. V pleistocénu následně došlo k procesům periglaciálního geomorfologického cyklu. A v holocénu byly vytvořeny povrchové sedimenty. Na skalní podloží zde navazují pokryvy s mocnostmi 3-5 m ve spodní části svahů, 1-3 m ve vyšších oblastech a max. 2 m ve vrcholových pásech. Kvůli nerovnosti hranice skalního podloží a soliflukčních procesů a v oblastech ronových kuželů jsou pokryvy mocné i 20 m, což lze pozorovat hlavně při patách svahů. Všechny tyto akumulace jsou tvořeny převážně hlinitokamenitou až balvanitou sutí s kamennými moři. Údolní náplavy jsou pak reprezentovány spíše slabě opracovanými valouny a balvany s hlinitopísčitou příměsí, celkově o mocnosti zhruba 5 m. Ve vyšších polohách lze sledovat také úvalovité deprese v místech pramenišť bystřin.

V širším měřítku je oblast prostoupena protáhlými a zaoblenými hřbety se spíše širšími sedly. Lze zde nalézt také silně mrazem zvětralé skály z dob ledových. Mrazivé klima mělo také vliv na vznik dalších unikátních útvarů jako kamenná moře tvořená mrazem tříděné půdy na holích. Kar Velké Kotliny je dodnes místem ohroženým lavinami a poslední sněhová pokrývka z něj mizí až začátkem července. Následně v době poledové docházelo vlivem nepropustného podloží ke vzniku rašenilišť a tvorbě zaříznutých údolí bystřinami s menšími vodopády kvůli spádu. Také se zde místně vyskytují krasové jevy, spíše charakteru podzemních dutin s krápníky. Povrchové projevy jsou spíše výjimečné a většinou bývají také pokryty vrstvou zvětralin. Nejvýznamnější krasové jevy v oblasti lze nalézt v zóně Branné, na JV svahu Ramzovského sedla a v lomu u Heřmanic.

3.3. Hydrologické a hydrogeologické poměry

Zájmová oblast je umístěna v pohoří Hrubý Jeseník, je tedy součástí hlavního evropského rozvodí. Na východní straně voda odtéká řekami povodí Odry do Baltského moře a voda ze západních svahů stéká přes povodí Moravy do Černého moře. Oblast je charakteristická vysokým srážkovým úhrnem. Území je prostoupeno bystřinami s vodopády pro překonání převýšení.

Z hydrogeologického hlediska je možné vymezit dva typy zvodnění, a to průlinovou podzemní vodu vázanou na sedimenty dna údolí s hladinou vody korespondující s hladinou

vody v toku a puklinový oběh podzemní vody. Celkově lze z provedených vrtných prací v rámci geologického průzkumu v letech 1966 až 1971 stanovit, že hladina vody ve svazích je silně rozkolísaná, přičemž jednotlivé bloky a kry masivu mají svůj vlastní režim a úroveň hladiny podzemní vody. Výskyt vody vázané ke svahovým sedimentům je nepravidelný v závislosti na atmosférických srážkách.

V zájmové oblasti jsou zastoupeny hlavně krystalické vápence. Právě zkrasovění karbonátů a výjimečné povrchové a podzemní jevy byly jedny z důvodů pro zařazení oblasti do CHKO. Jedná se zejména o rozsáhlé a mocné výskyty krystalických vápenců s překryvy tvořenými mladšími sedimenty. Devonské karbonáty vychází na povrch území jen velmi výjimečně a jejich přítomnost v podloží je velmi často dokázána až pomocí provedených vrtů. Z hlediska hydrogeologie je tato skutečnost důležitá, protože rozdílný stupeň zkrasovění má vliv nejen na hydrogeologické vlastnosti hornin, ale i na způsob proudění podzemních vod, čímž se mnohdy pohybujeme ve velmi složitých zvodněných systémech s rychlým prouděním podzemní vody otevřenými kanály většinou místního rozsahu. Nejvýraznější zkrasovění probíhá zejména v čistých krystalických vápencích s vysokým obsahem uhličitanu vápenatého bez jakýchkoliv příměsí, vloček či poloh jiných hornin.

Proudění je závislé zejména na influkci vody z povrchových toků lokalizovaných často mimo krasové území. Dále se voda rozšiřuje pomocí vzniklých cest v puklinovo-krasových systémech, čímž dochází k výraznému odvodnění zvodněných systémů pomocí laterálního spojení mezi infiltračními územími a jejich drenáží. Tyto kanály nejsou nijak vázány na zvětrané oblasti při povrchu území, naopak se vyskytují v hlubších oblastech zdravých hornin, čímž jsou spolu se svým nepříliš velkým průřezem jen velmi obtížně zachytitelné průzkumy z povrchu území (včetně geofyzikálních metod). V silně zkrasovělých oblastech může tato voda také vyvěrat na povrch území, což patří mezi projevy specifických krasových fenoménů, tzv. estavelů. Preferenční proudění může dosahovat do hloubky až několik stovek metrů pod povrch oblasti a rychlost proudění podzemních vod i několika km za den.

Oproti tomu v propustnějších puklinových systémech se může vyskytovat i regionální hladina podzemní vody s výše zavěšenými zvodněmi, což může být projevem přítomnosti tzv. zón epikrasu. Následně se zde vyskytují území mimo větší preferenční cesty, kde je proudění podzemní vody pomalého charakteru s postupným prostupem puklinami či jen drobnými póry v horninách až do míst, kde se voda dostane do krasového kanálu. Voda může být takto zadržena až několik let v horských oblastech a v nížinách i několik desítek let, čímž může docházet dlouhodobě k saturaci přilehlých zón. Pórovitost je silně závislá na typu hornin a může nabývat od prūlinové a puklinové až po kombinaci obou těchto s krasovou.

Proudění vody na zájmovém území je silně ovlivněno zejména rozvodnicí v pásmu Ramzové, která určuje hlavní směry proudění podzemní vody k J a k S. Jsou zde přítomny jak vápencové výskyty, tak i krasy s jeskyněmi (nejvýznamnější supíkovský kras u města Jeseník s jeskyněmi Na Špičáku). Zde vyskytující se prameny nabývají vydatnosti i několik desítek l/s.

3.4. Klimatické poměry

Pohoří Hrubý Jeseník, v jehož jádru se komplex PVE Dlouhé Stráně nachází, leží v rozhraní dvou klimatických oblastí. Přesněji se jedná o přechod mezi doznívajícím oceánským klimatem působícím ze západu a převládajícím kontinentálním klimatem přicházejícím z východu. Celkově se dá oblast charakterizovat vysokou relativní vlhkostí, spíše západním větrným prouděním a značným úhrnem srážek.

Podle Quittovy klasifikace podnebí na území Československa z roku 1971 [5] je zájmové území PVE Dlouhé Stráně zařazeno mezi chladné oblasti. Zatímco horní nádrž spadá kvůli svému vyššímu umístění do studenější klimatické jednotky CH4, dolní nádrž je díky svému nižšímu položení zařazena v mírnější klimatické jednotce CH6. Pro lepší názornost uvádím jednotlivé klimatické charakteristiky obou jednotek v následující Tab. 3.1.

	Horní nádrž	Dolní nádrž
Nadmořská výška v koruně hráze (Bpv)	1350,00 m n. m.	824,70 m n. m.
Klimatická jednotka	CH4	CH6
Počet letních dnů	0 až 20	10 až 30
Počet dnů s průměrnou teplotou 10°C a více	80 až 120	120 až 140
Počet mrazových dnů	160 až 180	140 až 160
Počet ledových dnů	60 až 70	60 až 70
Průměrná teplota v lednu	-6 až -7	-4 až -5
Průměrná teplota v červenci	12 až 14	14 až 15
Průměrná teplota v dubnu	2 až 4	2 až 4
Průměrná teplota v říjnu	4 až 5	5 až 6
Průměrný počet dnů se srážkami 1 mm a více	120 až 140	140 až 160
Srážkový úhrn ve vegetačním období	600 až 700	600 až 700
Srážkový úhrn v zimním období	400 až 500	400 až 500
Počet dnů se sněhovou přikrývkou	140 až 160	120 až 140

Počet zamračených dnů	130 až 150	150 až 160
Počet jasných dnů	30 až 40	40 až 50

Tab. 3.1: Klimatické charakteristiky dle Quitta [5]

Oblast CHKO Jeseníky se celkově vyznačuje velkými klimatickými rozdíly na poměrně krátkých vzdálenostech, což je ovšem zapříčiněno velkými rozdíly v nadmořské výšce na tomto území. Zajímavostí je, že počasí bývá často velmi odlišné na obou stranách hřebene pohoří Hrubého Jeseníku. Dochází zde k výskytu inverzí se slunečným a teplým počasím ve vyšších polohách, zatímco v níže položených kotlinách a údolích je mlha. Někde dochází také k významnému projevu mikro a mezoklimatu. Pro tuto oblast je charakteristický možný výskyt mrazů po celý rok, maximální teploty v letních dnech nepřesahující 25 °C, místní výskyt sněhové pokrývky i v letních měsících a nezřídka také sněhové laviny.

4. Rekognoskace poškození břehové linie dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně erozí

V této kapitole diplomové práce se zabývám rekognoskací poškození břehových pásem celé dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně se zvláštním důrazem na oblast kolem sdruženého objektu, které se budu následně věnovat detailně při navrhování sanace a protierozních opatření.

4.1. Technické řešení dolní nádrže

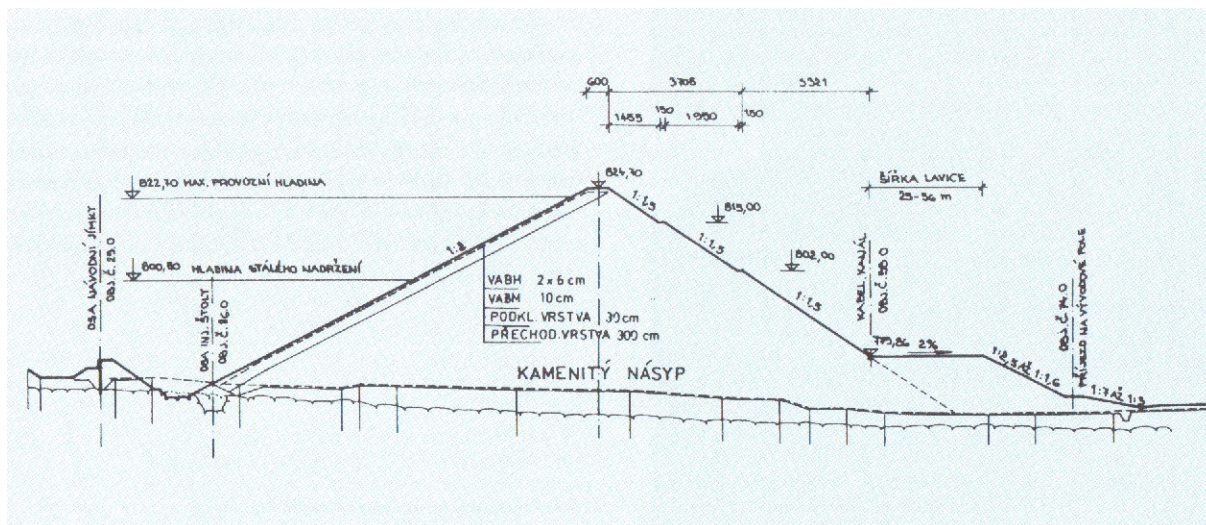
Technické provedení dolní nádrže a vybrané technické parametry nádrže jsou uvedeny v následující Tab. 4.2.

Objem stálého nadržení	0,825 mil. m ³
Provozní objem	2,580 mil. m ³
Celkový objem	3,405 mil. m ³
Hladina stálého nadržení	800,50 m n. m.
Maximální provozní hladina	822,70 m n. m.
Maximální zatopená plocha	16,13 ha
Kóta koruny hráze	824,70 m n. m.
Provozní kolísání hladiny	22,2 m
Maximální výška hráze v ose nad terénem	56,50 m

Tab. 4.2: Vybrané technické parametry dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně [1]

Nádrž byla vybudována jako klasická údolní nádrž pomocí přehrazení přirozeného toku Divoké Desné v oblasti Jezerní chaty. Hráz je tvořena kamenitým násypem s návodním asfaltobetonovým těsněním a nachází se na silně tektonicky exponovaném území. Rozvolnění skalního podkladu probíhá až do hloubky 5 m a navětrání zasahuje do hloubky až 15 m (zejména na pravém břehu) pod povrchem. Kvartérní pokryvy tvoří deluviální sedimenty, konkrétně hlinitokamenité suti přecházející směrem hlouběji od povrchu do sutí kamenitých a balvanitých. Ve svahovém pokryvu není dokumentována podzemní voda. Technické provedení hráze je znázorněno na příčném řezu na následujícím Obr. 4.5. Z hlediska hydrogeologických a klimatických poměrů zabírá plocha povodí nádrže 17,1 km², průměrné

roční srážky na jejím území jsou ve výši 1255 mm, průměrný průtok nádrží je ročně 0,46 m³/s a průměrná roční teplota se pohybuje mezi 3 °C až 5 °C. [1]



Obr. 4.5: Vzorový příčný řez hrázi dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně [1]

Samotné těleso hráze bylo pokládáno na zhuťnou základovou spáru ve vrstvách o mocnosti 0,90 až 1,20 m zhuťných šesti pojezdy vibračního válu Dynapac CH 61. Výstavba hráze tímto postupem trvala celkem 3 roky (od roku 1987 do roku 1990) za použití násypového materiálu o celkovém objemu 840 000 m³. Zdrojem této sypaniny byl z větší části (cca 62 %) 2,7 km vzdálený kamenolom Zámčisko, kde vystupuje zejména křemičitá biotitická rula. Pro zbývající část pak byl využit materiál z výlomu podzemních objektů. Na návodním líci byla dále realizována přechodová vrstva o tloušťce 3,0 m a následně na podkladní vrstvu umístěna konstrukce asfaltobetonového plášťového těsnění. Oproti tomu na vzdušný líc byla aplikována vrstva zahliněného materiálu o tloušťce 0,5 m a další vegetační úpravy pro vytvoření vegetačně zaceleného suťového pole. Toto řešení bylo navrženo s ohledem na snahu výrazně nenarušovat okolní přírodní ráz krajiny. [1]

Podloží hráze bylo těsněno jednořadou injekční clonou se třemi pořadími (délky až 38 m) při spoluúčinkování s fortifikačními vrty (do hloubky 11 až 12 m) a za použití injektážní směsi ze struskoportlandského cementu 250. Délka takto vytvořené clony je celkem 449 m s celkovou metráží vrtů 9 500 m a celkovou metráží fortifikace 4 900 m. [1]

Dolní nádrž PVE Dlouhé Stráně se začala napouštět dne 1.7.1992 s následným dosažením maximální hladiny dne 23.5.1993. Průsaky do injekční štol byly průměrně 2,2 l/s (zvláště v blízkosti desenského zlomu). [1]

Na následujícím Obr. 4.6 lze vidět pohled na dolní nádrž PVE Dlouhé Stráně těsně po jejím spuštění do provozu. Dolní nádrž je zachycena při napouštění vodou přiváděnou z horní nádrže.



Obr. 4.6: Finální podoba dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně po uvedení do provozu [1]

4.2. Vývoj eroze břehových pásem dolní nádrže

Při zhodnocení eroze břehových pásem v delším časovém měřítku jsem vycházela zejména ze 4. souhrnné etapové zprávy o technickobezpečnostním dohledu (dále SEZ o TBD) při trvalém provozu díla (2015) [12], zprávy pana Ing. Fouska (2015) [13] a dalších dokumentů posuzujících stavy poškození břehových pásem a jejich eroze zpracovaných společností SG-Geoinženýring s.r.o. [14, 15, 16].

Z odborných posudků obecně vyplývá dlouhodobý problém zvětrávání horninového masivu na břehových pásmech dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně. Ačkoliv byla v minulosti provedena opatření, která tento stav měla vyřešit, v dlouhodobém časovém měřítku se nakonec projevila jako neúspěšná. Závažnost situace a nutnost jejího řešení vyplývá zejména ze skutečnosti, že prakticky celý obvod dolní nádrže, s výjimkou úseku pravého břehu v těsné blízkosti hráze, je tvořen volnými břehy. Nejvýrazněji jsou narušeny svahy levého břehu již

od výstavby díla, kdy byl v tomto místě proveden zářez do horninového masivu, což lze vidět na následujícím Obr. 4.7. Na Obr. 4.8 lze poté vidět úpravu svahu za sruženým objektem po jeho dokončení. V posledních letech dochází také k porušování oblasti pravého břehu, což lze sledovat zejména ústupem břehu k přilehlé obslužné komunikaci.



Obr. 4.7: Betonáž sruženého objektu v dolní nádrži PVE Dlouhé Stráně při výstavbě [1]



Obr. 4.8: Úprava svahu za sruženým objektem po jeho výstavbě [1]

Intenzita břehových změn má vzhledem k délce období, kdy je toto vodní dílo v provozu, klesající trend a i díky tomu je obtížné tyto změny odhalit metodou přímého vizuálního pozorování. Problémem je zde fakt, že změny mohou probíhat jak plynule, tzn. odnos jemnozrnných frakcí, tak i skokově např. pádem uvolněných balvanů z výchozů skalního podkladu. Vzhledem k neustálým změnám klimatických poměrů v oblasti a provoznímu režimu nádrže, který je charakteristický výrazným kolísáním hladiny vody v nádrži ve velmi krátkém časovém úseku, lze do budoucna očekávat pouze negativní změny. Vzhledem k tomu je důležité provádět periodické sledování vývoje břehů, které na probíhající změny upozorní pro následnou aplikaci dalších opatření. Stabilita svahů je nejvíce ohrožena plošnými sesuvy ve střední části svahů, které mají na obou březích různé projevy, a to:

- **plošné sesuvy svahových pokryvů** na levém břehu, které způsobuje rozdílné uspořádání navzájem oddělených částí svahového pokryvu malé mocnosti, nesouvislý výskyt keřového porostu, přítoky srážkové vody a výrony puklinové vody,
- **přímé ohrožení stability vzrostlých stromů** na levém břehu, které je způsobeno postupující erozí svahu,
- **odpady zemin na odlučných stěnách** na pravém břehu v blízkosti obslužné komunikace, kde je částečně zpomaluje také kořenový systém vegetace.

Kromě volných břehů jsou na březích dolní nádrže také úseky, které již byly podrobeny stabilizačním opatřením. Jedná se celkem o tři typy opatření, kdy dva z nich se nachází na levém břehovém pásmu za sdruženým objektem a třetí pak na pravém břehu v těsné blízkosti hráze. Jejich bližší popis uvádím v následující rekognoskaci jednotlivých břehových pásem v kapitole 4.3.

Je třeba konstatovat, že nejnebezpečnější období zatěžování patních částí údolních svahů již pominulo a dnes mluvíme spíše o dokončování modelace samotných břehových pásem. To se vyznačuje zejména posuvy suťového pláště a obnažováním výchozů skalního podkladu s odpadem jejich povrchové části. Kolísání hladiny vody v nádrži pak má za následek další snižování sklonu svahů. Tento stav je způsoben zejména působením klimatických vlivů v oblasti, kdy při teplotách pod 0 °C dochází k promrzání povrchové vrstvy suti vlivem nadzvedávání úlomků zledovatělou vodou. Kolísání hladiny tento proces jen zrychluje, jelikož při následném tání vody úlomky zpět dosednou na sebe a dochází k jejich posunu po svahu směrem do tělesa nádrže. K erozi břehů dále přispívá tvorba tzv. mrazových klínů, které jsou způsobeny přítoky vody do nespojitostí povrchové vrstvy

horninového masivu, kde následně zmrznou a dále přispívají k rozšiřování stávajících nespojitostí, jehož důsledkem je rozpad horninového masivu na jednotlivé bloky.

Z hlediska tektoniky jsou nejvýrazněji působící tektonické poruchy systémů SV-JZ a SZ-JV, které snižují pevnost horninového masivu zejména v místech vzájemného křížení. V důsledku následně dochází k oslabení horninového masivu a jeho rozdělení na více bloků, kdy u jednotlivých bloků může dále dojít k posunu do volného prostoru, tedy tělesa dolní nádrže.

4.3. Rekognoskace aktuálního stavu

Pro zjišťování aktuálního skutečného stavu porušení břehových pásem na dolní nádrži PVE Dlouhé Stráně jsem místo několikrát osobně navštívila. Dále uvádím vlastní fotodokumentaci stavu břehů pořízenou 02. 05. 2017 a 01. 06. 2017.

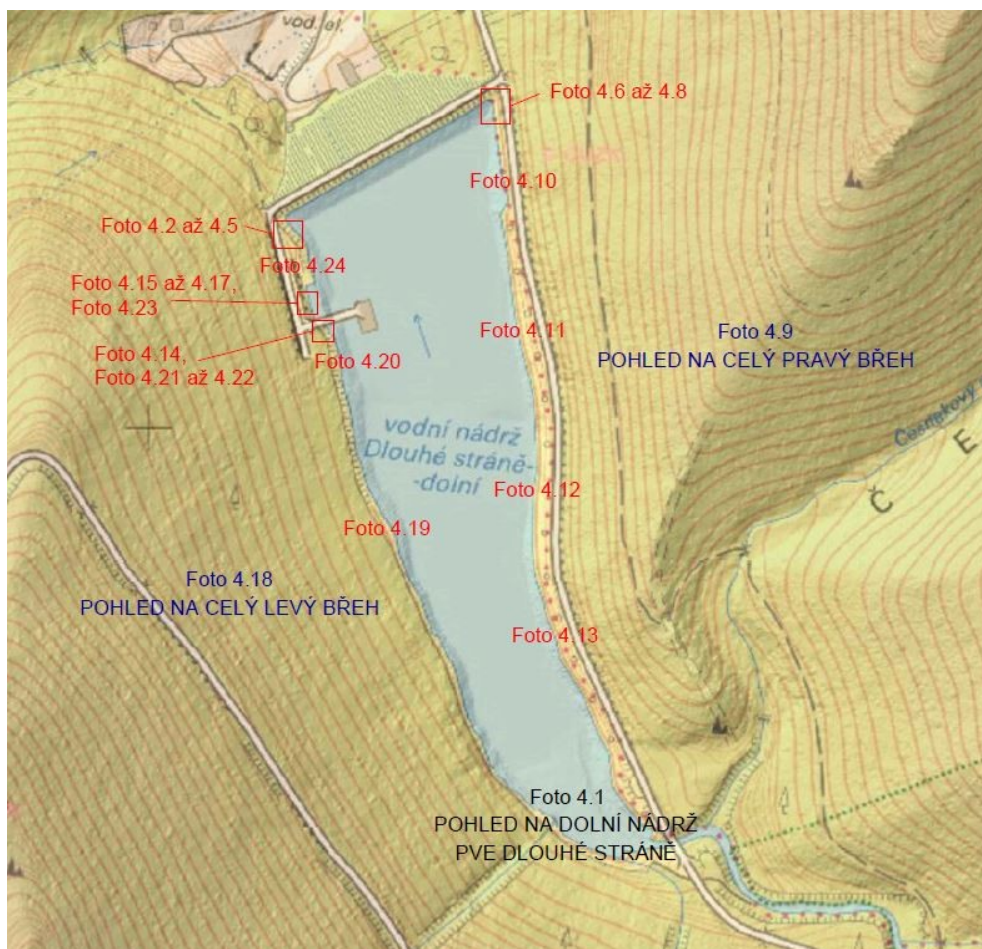


Foto 4.1: Pohled na oba břehy dolní nádrže z hráze [Foto autora]

Předcházející Foto 4.1 zobrazuje pohled na oba břehy dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně z hráze. Zde bych pro upřesnění uvedla, že vlevo je umístěno pravé břehové pásmo nádrže a vpravo za sdruženým objektem pak levé břehové pásmo nádrže. Uprostřed lze také v dálce vidět konec zátopové oblasti, kde se oba břehy sbíhají k sobě.

Nejdříve se v rekognoskaci věnuji pravému břehovému pásmu a následně pak detailněji levému břehovému pásmu, zvláště v oblasti za sdruženým objektem. Pro tuto oblast následně navrhuji a posuzuji v dalších kapitolách konkrétní sanaci a protierozní opatření.

Pro přehlednou orientaci je na následujícím Obr. 4.9 zobrazeno umístění fotografií uváděných v této kapitole. Mapový podklad byl přejet z Geoportálu ČUZK [11].



Obr. 4.9: Umístění vlastních fotografií uváděných v práci

Horninový masív je na svazích obou břehů tvořen převážně biotitickými kvarcitickými pararulami s plochami nespojitosti působícími kolmo na sebe. Pokryv pak tvoří kamenitá suť s hlinitopísčitou příměsí, jejíž úlomky jsou tvořeny převážně rulami s příměsemi žilných hornin, křemene a pegmatitu. Úlomky jsou ostrohranné různé velikosti od několika centimetrů po balvany velké několik desítek centimetrů, jak lze názorně vidět na následujících Foto 4.2 až 4.5. Obecně platí, že čím výše se úlomky nachází, tím větší velikost mají.



Foto 4.2: Velikosti úlomků tvořících svahy břehových pásem [Foto autora]



Foto 4.3: Velikosti úlomků tvořících svahy břehových pásem [Foto autora]



Foto 4.4: Velikosti úlomků tvořících svahy břehových pásem [Foto autora]



Foto 4.5: Velikosti úlomků tvořících svahy břehových pásem [Foto autora]

4.3.1. Pravé břehové pásmo

V těsné blízkosti hráze je část svahu, cca v délce 50 m, zajištěna gabionovými matracemi. Toto opatření bylo realizováno již při výstavbě hráze a doposud plní svou funkci bez výraznějších problémů. Konstrukci je ovšem nutné pravidelně kontrolovat a udržovat. Kromě zanášení okolní vegetací či napadanými větvemi dochází v posledních letech také k občasnému vyplavování jemnějších úlomků materiálu z ok sítí zajišťujících rohože. Z hlediska tvaru rohoží dochází také k posunu materiálu směrem do tělesa nádrže a lze pozorovat lokální vyboulení. Aktuální stav zajištění svahu gabionovými matracemi je znázorněn na následujících Foto 4.6 až Foto 4.8.



Foto 4.6: Pohled na zajištění úseku pravého břehu gabionovými matracemi [Foto autora]



Foto 4.7: Detail napojení gabionových matrací na hráz dolní nádrže [Foto autora]



Foto 4.8: Detail deformace a zanesení gabionové matrace [Foto autora]

Dále jsou svahy pravé strany dolní nádrže tvořeny již volnými břehy bez aplikace jakýchkoliv stabilizačních opatření. Sklon svahu se pohybuje do 35° a při porovnání se svahy levého břehového pásma jsou jeho části strmější. V oblasti blíže k hrázi je hlinitokamenitý povrch jemnějšího charakteru o mocnosti 1 m bez keřového porostu s nespojitým povrchem. Dále je pak suťový povrch hrubší a postupně stabilizován i keřovým porostem s četnějšími výchozy skalního podkladu. Na těchto výchozech lze lokálně pozorovat plochy nespojitosti. Stabilitu svahů momentálně zlepšují kořeny stromů v blízkosti obslužné komunikace, ovšem vzhledem k postupujícímu sesouvání narušených povrchových částí svahů směrem do tělesa nádrže nelze očekávat dlouhodobý efekt. Postup eroze svahu způsobuje obnažení kořenů

stromů odpadem povrchové suti na svazích, jejichž stabilitu následně zajišťuje jen povrchová vrstva vegetace a časem tak dochází k jejich řícení do tělesa nádrže. Nejvýrazněji lze tyto projevy sledovat ve střední části pravého břehu, jak lze vidět na následujících Foto 4.9 a v detailu na Foto 4.12. Konec zátopové oblasti je tvořen hrubým kamenitým pohozen s výskyty erozních rýh.

Za zmínku stojí také výskyt trhlin na okraji přilehlé komunikace blíže k nádrži s největším výskytem zhruba ve třetině délky pravého břehu směrem od hráze. Tento stav je závažný zejména z hlediska využití této komunikace, kdy zde dochází k frekventovanému provozu těžké techniky odvážející stromy a autobusů s turisty. V kombinaci s pokračující erozí pravého břehového pásma, které je v těsné blízkosti této komunikace, může v budoucnosti dojít k jejímu výraznému poškození.



Foto 4.9: Pohled na celý pravý břeh dolní nádrže z hráze [Foto autora]

Na následujících Foto 4.10 až Foto 4.13 jsou znázorněny detaily svahů pravého břehového pásma směrem od hráze po konec zátopové oblasti. Tyto fotografie byly pořízeny z pochozí plochy na sdruženém objektu.



Foto 4.10: Detail svahu pravého břehu nejbližší hrázi [Foto autora]



Foto 4.11: Detail svahu střední části pravého břehu blíže k hrázi [Foto autora]



Foto 4.12: Detail svahu střední části pravého břehu blíže k zátopové oblasti [Foto autora]



Foto 4.13: Detail svahu pravého břehu nejbliže zátopové oblasti [Foto autora]

4.3.2. Levé břehové pásmo

Levá část břehu dolní nádrže je v celé své délce tvořena volnými břehy s aplikací opatření pouze v oblasti za sdruženým objektem, kde je horninový masiv nejnarušenejší. Tento stav je způsoben zejména tvorbou zářezu do horninového masivu pro výstavbu sdruženého objektu, který jsem již zmiňovala v kapitole 4.2 a který je zobrazen na Obr. 4.7.

Oblast svahu vytvořeného zářezem za sdruženým objektem byla v době výstavby opatřena stabilizační konstrukcí z mřížoviny (velikost ok 15x30 cm, tloušťka drátu 6 mm), ocelových trubek (průměr 12 cm) a ocelových kotev (průměr 45 mm), které konstrukci uchycovaly ke svahu s využitím cementové zálivky.

Na levé straně, při pohledu ze sdruženého objektu na levý břeh, je konstrukce dlouhá zhruba 20 m stále částečně funkční, i přes její zjevné poškození (viz Foto 4.14). Dle Hájovského (2017) nejsou od roku 2011 na této konstrukci pozorovány žádné významnější změny. [16]

Oproti tomu na pravé straně, při pohledu ze sdruženého objektu na levý břeh, došlo k destrukci zhruba 15 m dlouhé konstrukce a po částečném odstranění zbytková ponechaná část již vůbec neplní svou původní stabilizační funkci. Na následující Foto 4.15 lze dokonce vidět pozůstatky kotevních tyčí trčících z horninového masivu ven, které jsou názornou ukázkou postupu eroze svahu. Při odstranění konstrukce mřížoviny a ocelových trubek v roce 2002 byly totiž kotvy upáleny těsně k tehdejší úrovni terénu a dnes trčí z horninového masivu ven zhruba 1,5 m své délky. Dále zde lze také vidět v levém horním rohu destrukci podezdění přilehlého inklinometrického vrtu.



Foto 4.14: Stabilizační opatření v levé části za sdruženým objektem [Foto autora]



Foto 4.15: Pozůstatky konstrukce v pravé části za sdruženým objektem [Foto autora]

Dále se na pravé straně nachází, při pohledu ze sdruženého objektu na levý břeh, také betonový blok délky 22 m, jehož podezdění bylo realizováno z konstrukce již uvedené mřížoviny a ocelových trubek. I v tomto případě došlo k destrukci ocelové konstrukce a její pozůstatky lze vidět na následující Foto 4.16. Momentálně je svah pod spodní hranou tohoto bloku směrem k nádrži ponechán volný a dochází zde k vypadávání suti, čímž se tato část bloku mění na převislý konec. Zpomalení tohoto procesu zajišťuje jen výchoz skalního podkladu ze svahu pod tímto blokem. Tento úsek je velmi kritický zejména s ohledem na hrozící sesuv tohoto betonového bloku, který by měl za následek nejen větší objem sesunutých hornin, ale také narušení rozsáhlejší oblasti horninového masivu. Aktuální stav lze vidět na následující Foto 4.16.



Foto 4.16: Betonový blok za sdruženým objektem ve svahu levého břehu [Foto autora]

Jako další z projevů postupu eroze lze uvést také destrukci betonového bloku v oblasti pod spojovacím mostem ke sdruženému objektu. Ten je značně poškozen v místě napojení na již dříve zmíněnou pravou část za sdruženým objektem s trčícími pozůstatky kotevních tyčí z horninového masivu (viz Foto 4.17).



Foto 4.17: Napojení betonového bloku na pravou část levého břehu [Foto autora]

Porušenost horninového masivu v oblasti levého břehu je značná a nejhorší oblastí je území za sdruženým objektem. Intenzivní mechanické rozrušení zde bylo zjištěno do hloubky 5 až 10 m s mírnějšími projevy dokonce až do hloubky 30 až 50 m. Obecně je sklon svahů levého břehu plošší než sklon svahu pravého břehu.



Foto 4.18: Pohled na celý levý břeh dolní nádrže ze začátku pravého břehu [Foto autora]

Oblast svahu od hráze ke sdruženému objektu se vyznačuje mělkými sesuvy se sklonem svahu do 30° . Svah je tvořen v nižších polohách jemnějším hlinitokamenitým pokryvem, jehož úlomky se postupně zvětšují až na výskyt balvanů větších i více než 1 metr (viz předchozí Foto 4.5). Svah je předělen příjezdovou cestou ke sdruženému objektu, nad kterou

se dále nachází i vegetační pokryv s kamenitými hlínami o malé mocnosti. V nižších polohách se pokryvy hlín nenacházejí, což je důsledkem zejména sesouvání, které není po délce svahu souvislé. Výjimkou nejsou ani výskyty erozních rýh, které v suti vznikají stékajícími srážkovými vodami ze svahu.

Svah levého břehu dále od sdruženého objektu po konec zátopové oblasti je o něco strmější se sklonem cca 35°. Je tvořen kamenitou suti dosahující až k úrovni výše položeného lesa, kde hrozí podemletí stromů a jejich následný pád do tělesa nádrže. Oblast na následující Foto 4.21, tedy ke sdruženému objektu nejbližší, je opatřena stále částečně funkčním stabilizačním opatřením z dob výstavby nádrže. Díky tomu nedochází k výraznějším poruchám horninového masivu a destrukci břehového pásma jako v jiných oblastech nádrže. Na následující Foto 4.20 a částečně i na Foto 4.19 lze vidět zhruba 50 m dlouhý svah s výrazně nižším sklonem než předcházející oblasti. Tento úsek je bez výraznějších projevů eroze či lokálních sesuvů povrchové vrstvy suti do tělesa dolní nádrže. Poté následuje oblast s prudšími sklony svahů až do konce zátopové oblasti. Zde dochází opět k sesuvům povrchové vrstvy suti, narušení horninového masivu s pádem větších úlomků a také k ohrožení stability stromů v přilehlém zalesněném pásmu. Situace je znázorněna na Foto 4.19.



Foto 4.19: Oblast levého břehu směrem od konce zátopové oblasti [Foto autora]

Konec zátopové oblasti je pak tvořen hrubým kamenitým pohozením s výskyty erozních rýh, velkými balvany a výchozy skalního podkladu.

Náplavový kužel na konci vzduť je plochý s různorodým ukládáním splavenin. Celkově platí, že granulometrické složení suti na svazích a těchto splavenin je velmi variabilní.

Na předcházející Foto 4.19 a následujících Foto 4.20 až Foto 4.24 jsou znázorněny detaily svahů levého břehového pásma směrem od konce zátopové oblasti po hráz. Tyto fotografie byly pořízeny z pochozí plochy na sdruženém objektu, příp. ze spojovacího mostu.



Foto 4.20: Oblast zálivu v levém úseku za sdruženým objektem [Foto autora]



Foto 4.21: Levý úsek svahu za sdruženým objektem s opatřením [Foto autora]



Foto 4.22: Oblast svahu v těsné blízkosti napojení spojovacího mostu [Foto autora]



Foto 4.23: Pravý úsek svahu za sdruženým objektem s betonovým blokem [Foto autora]



Foto 4.24: Oblast levého břehu od sdruženého objektu k hrázi [Foto autora]

V roce 2015 byl proveden potápěčský průzkum pod úrovní minimální hladiny v dolní nádrži. Tento průzkum se zaměřoval hlavně na posouzení stavu konstrukce sdruženého objektu. Orientačně pak bylo zdokumentováno i břehové pásmo v širším rozsahu. Vzhledem ke zjištění značného poškození horninového masivu byl následně v roce 2016 realizován podrobný potápěčský průzkum, jehož úkolem bylo zdokumentovat stav břehového pásma a objemy povrchové suti napadané u paty svahu. Zjištění tohoto průzkumu potvrdila značné poškození horninového masivu s nutností provedení stabilizačních opatření. Nejkritičtější je stav pravé části svahu levého břehu, tedy od sdruženého objektu směrem k hrázi. Pro tuto oblast následně navrhuji v kapitole 6 způsob sanace a protierozní opatření. Pro zjištění parametrů horninového masivu jsem také z této oblasti odebrala vzorky pro laboratorní zkoušky uvedené v následující kapitole 5.

5. Výsledky laboratorních zkoušek odebraných vzorků

Pro zjištění pevnostních a deformačních parametrů hornin tvořících horninový masiv jsem z břehu dolní nádrže odebrala několik vzorků, které jsem následně podrobila laboratorním zkouškám. Jedná se o 16 větších úlomků horninového masivu, které tvoří po zatřídění 6 úlomků biotitové ruly a 6 úlomků amfibolitu, dále přibližně 3 kg vzorku povrchové suti. Všechny vzorky jsem odebrala z části levého břehového pásma mezi sdruženým objektem a hrází dolní nádrže z nadmořských výšek, které se vyskytují pod maximální hladinou vody v nádrži.

Odebrané úlomky hornin byly nejdříve očištěny, vyfotografovány a zatříděny. Následně byly vybrané kusy rozřezány na krychle 50x50x50 mm a podrobeny laboratorním zkouškám pro stanovení:

- nasákavosti přírodního kamene vodou za atmosférického tlaku dle ČSN EN 13755 [17],
- mrazuvzdornosti přírodního kamene dle ČSN EN 12371 [18],
- pevnosti přírodního kamene v prostém tlaku dle ČSN EN 1926 [19].

Odebraný vzorek povrchové suti byl podroben laboratorní zkoušce pro stanovení zrnitosti – síťovému rozboru dle ČSN EN 933-1 [20] a následně zatříděn dle ČSN EN ISO 14688 [21, 22]. Pro přehlednost jsem provedla zatřídění také dle dnes již neplatné ČSN 73 1001 [23].

5.1. Dokumentace a zatřídění odebraných úlomků hornin

Na následujících Foto 5.25 až Foto 5.40 jsou znázorněny očištěné vzorky hornin.



Foto 5.25: Vzorek 1 [Foto autora]



Foto 5.26: Vzorek 2 [Foto autora]



Foto 5.27: Vzorek 3 [Foto autora]



Foto 5.31: Vzorek 7 [Foto autora]



Foto 5.28: Vzorek 4 [Foto autora]



Foto 5.32: Vzorek 8 [Foto autora]

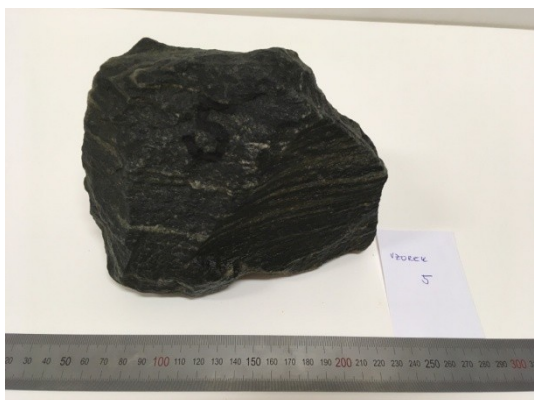


Foto 5.29: Vzorek 5 [Foto autora]



Foto 5.33: Vzorek 9 [Foto autora]



Foto 5.30: Vzorek 6 [Foto autora]



Foto 5.34: Vzorek 10 [Foto autora]



Foto 5.35: Vzorek 11 [Foto autora]



Foto 5.38: Vzorek 14 [Foto autora]



Foto 5.36: Vzorek 12 [Foto autora]



Foto 5.39: Vzorek 15 [Foto autora]



Foto 5.37: Vzorek 13 [Foto autora]



Foto 5.40: Vzorek 16 [Foto autora]

V následující Tab. 5.3 uvádím zatřídění těchto vzorků hornin včetně vizuálního popisu jejich zbarvení, stupně zvětrání a struktury:

Vzorek č.	Hornina	Barva	Stupeň zvětrání	Struktura
1	Rula biotitová	bílošedá	středně	makroskopicky celistvá
2	Rula biotitová	šedohnědá	středně	makroskopicky celistvá

3	Amfibolit	tmavě šedá	středně	porfiroblastická, s jemnozrnnou základní hmotou
4	Rula biotitová	tmavě šedá	středně	plošně paralelní, kompaktní, s jemnozrnnou základní hmotou
5	Rula biotitová	světle šedá	slabě	plošně paralelní, kompaktní, s jemnozrnnou základní hmotou
6	Rula biotitová	světle hnědá	silně	makroskopicky celistvá
7	Rula biotitová	šedohnědá	silně	makroskopicky celistvá
8	Amfibolit	tmavě šedá	slabě	plošně paralelní, kompaktní, s jemnozrnnou základní hmotou
9	Amfibolit	tmavě šedá	slabě	plošně paralelní, kompaktní, s jemnozrnnou základní hmotou
10	Amfibolit	světle šedá	silně	plošně paralelní, kompaktní, s jemnozrnnou základní hmotou
11	Amfibolit	tmavě šedá	středně	plošně paralelní, kompaktní, s jemnozrnnou základní hmotou
12	Amfibolit	šedá	slabě	plošně paralelní, kompaktní, s jemnozrnnou základní hmotou
13	Amfibolit	tmavě šedá	středně	plošně paralelní, kompaktní, s jemnozrnnou základní hmotou
14	Rula biotitová	šedohnědá	slabě	makroskopicky celistvá
15	Amfibolit	tmavě šedá	slabě	plošně paralelní, kompaktní
16	Rula biotitová	světle šedá	slabě	makroskopicky celistvá

Tab. 5.3: Popis a zařazení odebraných vzorků hornin

Pro provedení dalších zkoušek nasákavosti, mrazuvzdornosti a pevnosti v prostém tlaku bylo nutné vzorky nařezat do tvaru krychlí o rozměrech zhruba 50x50x50 mm. Konkrétně byly dále použity a nařezány vzorky biotitové ruly č. 2, 7, 16 a vzorky amfibolitu č. 3, 12, 13, 15 (v předchozí Tab. 5.3 jsou zvýrazněny tučně).

Označení vzorků bylo voleno dle čísla původního rozřezaného vzorku a následně číselného označení pořadí krychlí, které byly z daného vzorku pořízeny. Celkem bylo v laboratorních zkouškách použito 16 ks krychlí biotitové ruly a 13 ks krychlí amfibolitu.

Na následující Foto 5.41 lze vidět již nařezané krychle. Krychle pořízené ze vzorků biotitové ruly jsou umístěny ve 3 pravých sloupcích a krychle pořízené z amfibolitů pak ve 3 levých sloupcích. Krychle jsou umístěny nahoru plochou, která byla následně zatěžována v laboratorní zkoušce pevnosti v prostém tlaku.

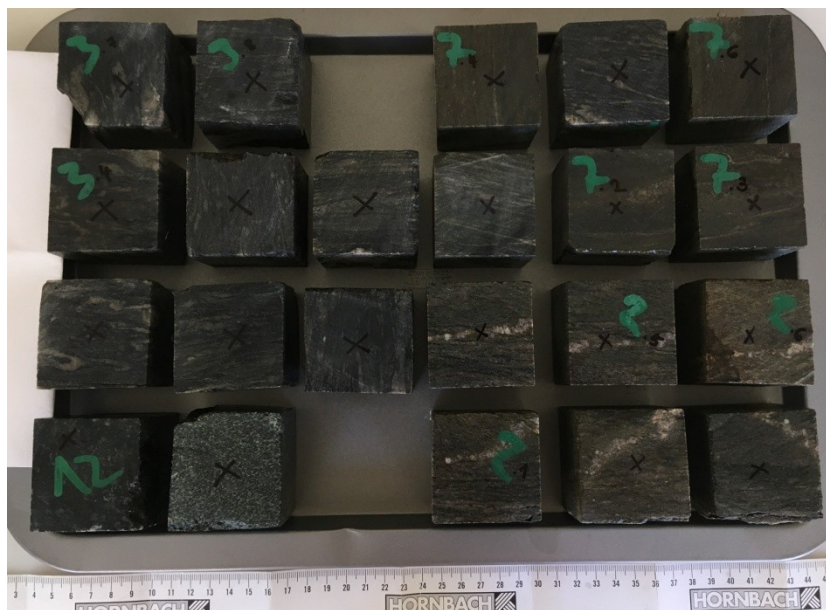


Foto 5.41: Nařezané vzorky biotitové ruly a amfibolitu [Foto autora]

Je třeba si uvědomit, že následně uváděné výsledky jednotlivých laboratorních zkoušek se vztahují pouze k odebraným vzorkům hornin a povrchové suti z konkrétních oblastí odběru. Z hlediska popisu chování horninového masivu jako celku a jeho vlastností tedy může docházet k rozporům s těmito výsledky.

5.2. *Nasákavost přírodního kamene vodou za atmosférického tlaku*

Zkouška nasákavosti přírodního kamene vodou za atmosférického tlaku byla provedena dle ČSN EN 13755 [17]. Byly využity nařezané krychle o rozměrech cca 50x50x50 mm ze vzorků biotitové ruly č. 2, 7 a vzorků amfibolitu č. 3, 12, 13.



Foto 5.42: Vzorky pod hladinou vody pro stanovení jejich nasákavosti [Foto autora]

Vzorky byly nejdříve vloženy do sušárny na 24 hodin, aby byly zcela zbaveny veškeré vody. Poté byly zváženy na digitální váze a vloženy do nádoby, kde byly ponechány pod postupně zvyšovanou hladinou vody po 48 hodin při pokojové teplotě (viz předchozí Foto 5.42).

Následně byly vzorky vyjmuty ven, osušeny a znovu zváženy. Zaznamenané hodnoty těchto měření jsou uvedeny v následující Tab. 5.4. Nasákavost jednotlivých vzorků vodou za atmosférického tlaku je následně vyjádřena hodnotou A_b [%] dle vzorce:

$$A_b = \frac{m_s - m_d}{m_d} * 100 \quad (1)$$

kde: m_s je hmotnost vysušeného zkušební vzorku [g],
 m_d je hmotnost nasyceného zkušební vzorku [g].

Typ horniny	Vzorek č.	Hmotnost vysušeného vzorku m_d [g]	Hmotnost nasyceného vzorku m_s [g]	Nasákavost A_b [%]
Biotitová rula	2.1	338,8	342,4	1,1
	2.2	351,0	355,2	1,2
	2.3	337,2	341,2	1,2
	2.4	335,8	339,6	1,1
	2.5	333,6	337,2	1,1
	2.6	341,8	346,0	1,2
	7.1	336,6	338,6	0,6
	7.2	336,0	338,6	0,8
	7.3	338,8	340,8	0,6
	7.4	336,2	338,6	0,7
	7.5	336,0	338,0	0,6
	7.6	335,2	337,6	0,7
Amfibolit	3.1	352,6	354,4	0,5
	3.2	346,2	348,4	0,6
	3.3	352,6	354,2	0,5
	3.4	338,2	339,8	0,5
	3.5	346,2	348,2	0,6
	3.6	349,0	351,2	0,6
	3.7	324,2	326,0	0,6

	3.8	344,2	346,2	0,6
	12	356,4	357,4	0,3
	13	412,4	414,4	0,5

Tab. 5.4: Měření nasákavosti vzorků vodou za atmosférického tlaku

Obecně lze z výsledků měření říci, že nasákavost vzorků biotitické ruly je vyšší než u vzorků amfibolitu, ovšem u obou se jedná o velmi malou hodnotu nasákavosti do 1,5 %.

Nasákavost vzorků biotitické ruly se pohybuje od 0,6 % do 1,2 % s průměrnou hodnotou 0,9 %. Nasákavost vzorků amfibolitu pak nabývá nižších hodnot od 0,3 % do 0,6 % s průměrnou hodnotou 0,5 %. Vzhledem k tomu, že u vzorků obou typů hornin se jedná o velmi malou hodnotu nasákavosti, považuji ji v návrhu za zanedbatelnou.

Uvědomuji si, že pro zhodnocení vlastností hornin v dané situaci by bylo lepší využití zkoušky pro zjištění jejich propustnosti, ovšem po konzultaci s pracovníky Laboratoře stavebních hmot na Fakultě stavební VŠB-TUO jsem byla od této zkoušky nucena upustit. Problémem je totiž odběr vzorků hornin, které nešlo získat z mnou odebraných úlomků biotitické ruly a amfibolitu, ale bylo nutné vzorky odebrat přímo na místě jejich uložení vyvrtáním z dostatečně velkých úlomků těchto hornin. Složitost mechanického odebrání za použití těžké techniky by dále ztěžoval provozní charakter elektrárny, kdy by v průběhu odebrání vzorků docházelo ke zvyšování hladiny vody v nádrži. Vzorky pro stanovení propustnosti musí být ve tvaru válců s průměrem 70 mm a minimální výškou 140 mm.

5.3. Mrazuvzdornost přírodního kamene

Zkouška mrazuvzdornosti přírodního kamene byla provedena dle ČSN EN 12371 [18]. Byly využity nařezané krychle o rozměrech cca 50x50x50 mm ze vzorků biotitové ruly č. 2, 7 a vzorků amfibolitu č. 3, 12, 13.

Zkouška se skládá z cyklů zmrazování vzorků na vzduchu a následně jejich rozmrazování ve vodě. Délka jednoho cyklu je 12 hodin a zkouška probíhá kontinuálně v mrazícím boxu s automatickým regulačním systémem pro programování zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů (viz následující Foto 5.44). V rámci 5 stádií je měněna teplota ve středu zkušební tělesa v rozmezí hodnot od -12 °C do 20 °C. Jako zkušební těleso pro monitorování teploty byl vybrán vzorek biotitové ruly č. 2.3 (viz Foto 5.43).



Foto 5.43: Čidlo pro monitorování teploty umístěné ve vzorku 2.3 [Foto autora]



Foto 5.44: Mrazicí box [Foto autora]

Vzorky byly připraveny v rámci provedení zkoušky nasákavosti přírodního kamene vodou za atmosférického tlaku, tedy po 24 hodin sušení v sušárně a následně ponechány po 48 hodin pod hladinou vody. Následně byly vzorky vloženy do mrazicího boxu a nastavena doba trvání 120 cyklů, což odpovídá délce 60 dnů. Počet cyklů byl stanoven dle počtu mrazových dnů pro klimatickou jednotku CH6, do které svým umístěním spadá dolní nádrž PVE Dlouhé Stráně (viz Tab. 3.1). Ovšem dle očekávaného využití mrazicího boxu v Laboratoři stavebních hmot na Fakultě stavební VŠB-TUO bylo nutné ideální počet 140 až 160 cyklů zkrátit na realizovaných 120 cyklů.

Polovina vzorků byla vytáhnutá z mrazicího cyklu v polovině, tedy po 60 cyklech (30 dnech). Zbytek vzorků byl ponechán v mrazicím boxu celých 120 cyklů. Na následující Foto 5.45 jsou znázorněny vzorky umístěné v mrazicím boxu v průběhu cyklů zmrazování a rozmrazování.



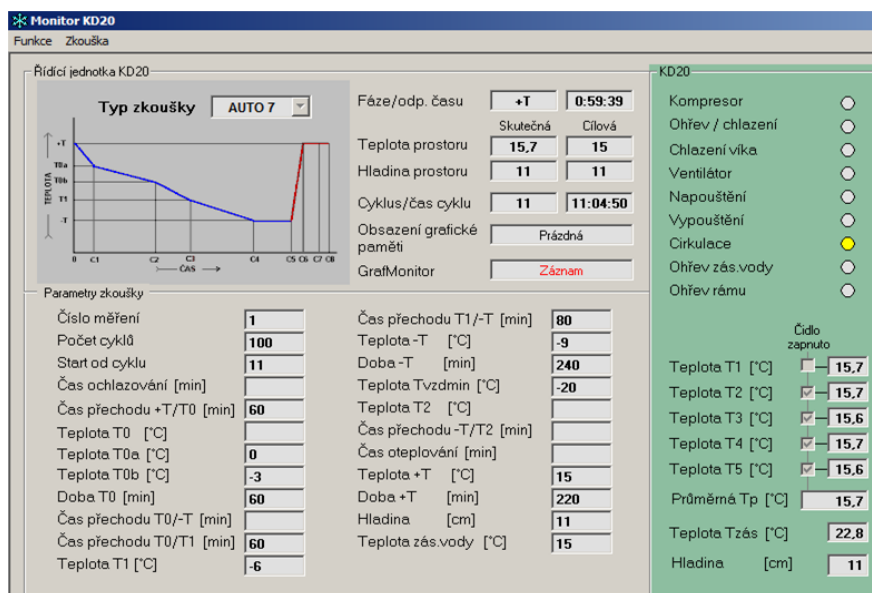
Foto 5.45: Vzorky v mrazícím boxu [Foto autora]

Pro zkoušku mrazuvzdornosti byly konkrétně použity vzorky uvedené v následující Tab. 5.5 spolu s uvedením počtu cyklů zmrazování a rozmrazování, kterým byly podrobeny.

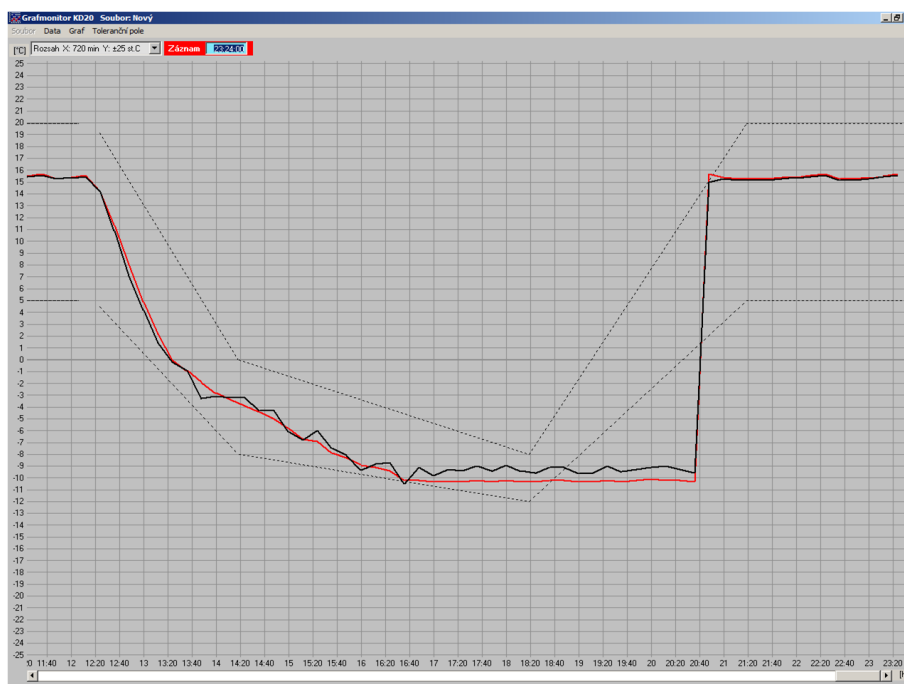
Typ horniny	Vzorek vyjmut po 60 cyklech	Vzorek vyjmut po 120 cyklech
Biotitová rula	2.1	2.2
	2.5	2.4
	7.1	2.6
	7.2	7.3
	7.4	7.5
		7.6
	Vzorek č. 2.3 byl použit jako teplotní čidlo	
Amfibolit	3.3	3.1
	3.7	3.2
	3.8	3.4
	12	3.5
		3.6
		13

Tab. 5.5: Vzorky podrobené zkoušce mrazuvzdornosti

Na následujících Obr. 5.10 a Obr. 5.11 je znázorněno nastavení zkoušky mrazuvzdornosti a grafický průběh jednoho cyklu zmrazování a rozmrazování vzorků v délce 12 hodin, tj. 720 minut.



Obr. 5.10: Nastavení zkoušky mrazuvzdornosti



Obr. 5.11: Průběh zkoušky mrazuvzdornosti v jednom cyklu (12 hodin)

Z hlediska vizuálního popisu vzorků se vzorky pohybují v rozmezí hodnot 0 až 2 stupnice dle ČSN EN 12371 [18]. Stupnice je uvedena v následující Tab. 5.6. Při porovnání stavu vzorků před cykly, v jejich polovině a na konci všech cyklů nejde vizuálně rozeznat výrazné rozdíly. Ve vzorcích nebyly zaznamenány nové trhliny, díry či oddělení částic. Pokud

již byly ve vzorcích trhliny přítomny před začátkem této zkoušky, mohlo dojít k jejich mírnému prodloužení v tělese vzorku, ne však o více než 0,1 mm.

0	zkušební těleso je neporušeno
1	velmi malé poškození (menší zaoblení rohů a stran), které neohrožuje celistvost zkušebního tělesa
2	jedna nebo několik menších trhlin (šířky $\leq 0,1$ mm) nebo oddělení malých částic (částice o velikosti ≤ 30 mm ²)
3	jedna nebo několik trhlin, děr nebo oddělení větších částic než které jsou definovány ve stupni 2, nebo změna materiálu v žilkách, nebo zkušební těleso vykazuje důležité známky drobení nebo rozpadu
4	zkušební těleso s významnými trhlínami nebo rozlomené na dva nebo více kusů, nebo rozpadlé

Tab. 5.6: Stupnice vizuální kontroly dle ČSN EN 12371 [18]

Zkouška mrazuvzdornosti byla provedena zejména za účelem zjištění vlivu cyklů zmrazování a rozmrazování na změny hodnot pevnosti v tlaku daných vzorků hornin v porovnání se vzorky, které zkoušce mrazuvzdornosti podrobeny nebyly. Zhodnocení tohoto vývoje je uvedeno v následující kapitole

5.4. Pevnost přírodního kamene v prostém tlaku

Zkouška pevnosti přírodního kamene v prostém tlaku byla provedena dle ČSN EN 1926 [19]. Byly využity nařezané krychle o rozměrech cca 50x50x50 mm ze vzorků biotitové ruly č. 2, 7, 16 a vzorků amfibolitu č. 3, 12, 13, 15.

Zkouška spočívá v uložení očištěných vzorků na plochu zkušební lisu do jejího středu. Následně je vzorek zatěžován rovnoměrně rozloženým zatížením, jehož hodnota je postupně zvyšována, dokud nedojde k porušení vzorku.

Vzorky bylo před provedením zkoušky nutné vložit do sušárny na 24 hodin, aby byly zcela zbaveny veškeré vody. Následně byly vzorky změřeny v obou směrech zatěžovací plochy na 3 místech s následným vytvořením průměrných hodnot délek v horizontálním směru. Dále byla změřena také jejich výška.

Pro provedení zkoušky pevnosti v prostém tlaku byly využity jak vzorky z již provedené zkoušky mrazuvzdornosti, tak zcela nové vzorky. Srovnání jejich výsledků pevnosti v prostém tlaku pak lze sledovat vliv cyklů zmrazování a rozmrazování na pevnost daných hornin.

Vzorky byly zatěžovány na plochu označenou křížkem (viz předcházející Foto 5.41). Tato plocha byla u každého vzorku specificky vybrána tak, aby zatížení zkušebního lisu působilo rovnoběžně s plochami anisotropie, a tedy aby bylo dosaženo co nejvíce nepříznivého výsledku pevnosti vzorků v prostém tlaku.

V následující Tab. 5.7 lze vidět rozdělení vzorků a jejich výsledné hodnoty pevností v prostém tlaku. Pevnost zkušebních těles v prostém tlaku je vyjádřena hodnotou R [MPa] dle vzorce:

$$R = \frac{F}{A} \quad (2)$$

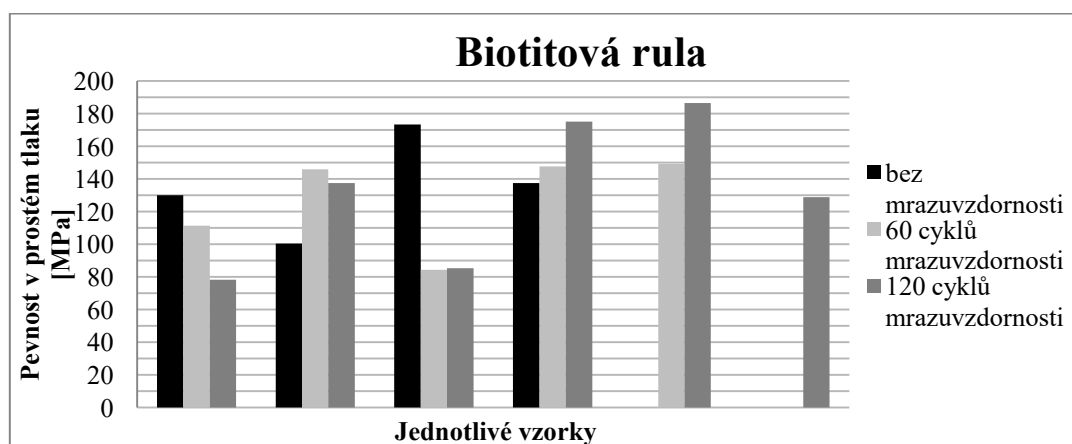
kde: F je zatížení při porušení [kN],
 A je plocha příčného průřezu zkušební tělesa [mm²],
 l aritmetické průměry délek v horizontálním směru [mm],
 h výška zkušební tělesa [mm].

Typ horniny	Typ vzorku	Vzorek č.	Délka l_1 [mm]	Délka l_2 [mm]	Výška h [mm]	Síla F [kN]	Pevnost R [MPa]
Biotitová rula	bez mrazuvzdornosti	16.1	51,3	51,4	49,7	342,70	129,99
		16.2	51,9	50,2	51,6	261,6	100,41
		16.3	49,2	49,8	50,6	424,1	173,41
		16.4	50,7	46,6	50,6	324,5	137,41
	60 cyklů mrazuvzdornosti	2.1	50,7	51,1	50,8	288,8	111,36
		2.5	50,6	50,4	50,0	372,3	146,02
		7.1	51,1	48,7	52,6	210,3	84,39
		7.2	51,3	51,7	48,4	391,3	147,59
		7.4	51,0	51,5	48,9	392,2	149,32
	120 cyklů mrazuvzdornosti	2.2	50,7	50,3	52,3	199,4	78,28
		2.4	50,6	50,4	50,3	350,8	137,53
		2.6	49,6	49,9	51,1	211,1	85,26
		7.3	51,1	51,0	49,0	455,8	175,10
		7.5	51,3	51,0	48,5	487,5	186,51
		7.6	51,4	51,0	49,1	338,0	128,79
Amfibolit	bez mrazuvzdornosti	15.1	49,0	48,0	50,9	306,8	130,44
		15.2	50,9	51,3	52,1	378,7	144,97

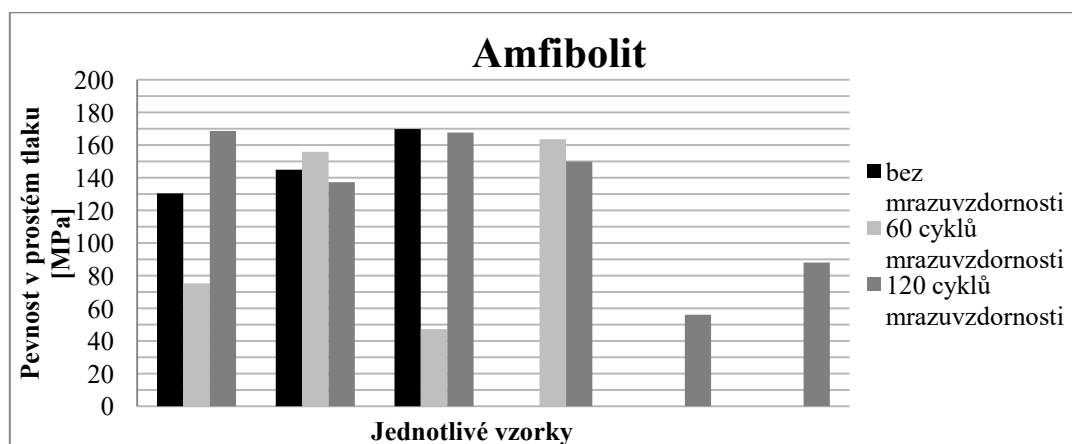
		15,3	49,6	51,1	50,8	430,8	169,87
	60 cyklů mrazuvzdornosti	3,3	49,3	51,4	51,3	190,9	75,35
		3,7	45,8	44,6	48,9	318,3	156,00
		3,8	48,3	51,7	51,5	117,9	47,25
		12	49,9	50,9	51,9	415,6	163,63
	120 cyklů mrazuvzdornosti	3,1	51,1	50,4	52,0	434,2	168,59
		3,2	49,3	50,7	51,5	343,5	137,21
		3,4	50,4	50,0	48,9	422,6	167,63
		3,5	51,0	50,4	50,0	385,1	149,94
		3,6	49,7	51,5	50,7	143,5	56,09
		13	50,3	51,8	50,6	229,4	87,96

Tab. 5.7: Rozměry vzorků a měření pevnosti v prostém tlaku

Následující Graf 5.1 a Graf 5.2 graficky zobrazují jednotlivé rozčlenění pevností z měření dle Tab. 5.7.



Graf 5.1: Pevnosti vzorků biotitové ruly v prostém tlaku



Graf 5.2: Pevnosti vzorků amfibolitu v prostém tlaku

Z hodnot měření uvedených v předchozích Tab. 5.7, Graf 5.1 a Graf 5.2 lze pozorovat výskyt 2 skupin výsledků, a to konkrétně méně zastoupenou část více poškozených vzorků s pevnostmi do 100 MPa včetně a poté část vzorků s pevnostmi v rozmezí od 100 MPa do 200 MPa. Ovšem vzhledem k počtu odebraných vzorků a jejich rozdílnému stádiu porušení nelze považovat výsledky za reprezentativní skupinu pro celý horninový masiv. Spíše je možné je chápat jako rozsah hodnot, v rámci kterých se pevnost tohoto horninového masivu pohybuje. Ovšem i za tohoto předpokladu patří zkoumané horniny podle pevnosti horninového materiálu do třídy R2 s vysokou pevností v rozmezí 50 až 150 MPa. Také je nutné zdůraznit, že výsledky lze vztahovat jen k dané oblasti, odkud byly vzorky odebrány (viz Obr. 4.9), v jiných částech břehů mohou být vlastnosti odlišné.

Pro srovnání jsou dále v textu uvedeny obecné parametry rul a amfibolitů v obecném smyslu skupin hornin, aby šlo jasně vidět, jaký vliv na pevnost těchto hornin mají působící klimatické vlivy a kolísání hladiny vody v dolní nádrži PVE Dlouhé Stráně. Dle Petránka (2016) jsou parametry rul a amfibolitů odlišné. Zatímco ruly podle něj mají pevnost v tlaku za sucha 120 až 140 MPa, amfibolity dosahují pevnosti v tlaku za sucha pak 150 až 280 MPa. [10]

Z výsledků lze vidět, že zatímco naměřené pevnosti vzorků biotické ruly se pohybují spíše nad tímto rozmezím, naměřené pevnosti amfibolitů se pohybují na jeho spodní hranici. Na nereprezentativnost souboru odebraných vzorků také upozorňuje skutečnost, že maximální hodnoty pevnosti v prostém tlaku dosáhl vzorek biotitové ruly ve výši 186,51 MPa a naopak nejnižší hodnotu pevnosti měl vzorek amfibolitu ve výši 45,25 MPa. Lze také pozorovat výrazné změny pevnosti v rámci jednotlivých krychlí nařezaných z jednoho vzorku, což je způsobeno zejména velikostí původních vzorků a jejich rozdílným stádiem zvětrání, kdy krychle blíže ke krajní ploše vzorků nabývají menší pevnosti, než ty umístěné blíže středu.

Obecně lze říci, že způsob porušení horninové hmoty u studovaných hornin úzce souvisí s primárním minerálním složením a strukturou horniny. U biotitických rul, které jsou tvořeny převážně horninotvornými minerály typu křemen, živce a biotit, je soustředěn do ploch zón souhlasně orientovaných s plochami foliace, a proto u těchto hornin dochází k porušování zejména podél ploch foliace (viz následující Foto 5.46 a Foto 5.47). Zatímco u amfibolitů, které sice mají také většinou strukturu plošně paralelní, ale v rámci minerálního složení je u nich větší zastoupení tmavých minerálů v celém objemu horninové hmoty, které snáze podléhají zvětrávání a tudíž k porušení hornin dochází jak podél ploch foliace, tak i puklinami napříč v důsledku napětí a zvětrání horninové hmoty (viz následující Foto 5.48 a Foto 5.49).



Foto 5.46: Vzorek biotitové ruly po vytáhnutí z lisu [Foto autora]



Foto 5.47: Porušená struktura vzorku biotitové ruly [Foto autora]



Foto 5.48: Vzorek amfibolitu po vytáhnutí z lisu [Foto autora]



Foto 5.49: Porušená struktura vzorku amfibolitu [Foto autora]

5.5. Sítový rozbor

Odebraný vzorek povrchové suti byl podroben laboratorní zkoušce pro stanovení zrnitosti – sítovému rozboru dle ČSN EN 933-1 [20] a následně zaříděn dle ČSN EN ISO 14688 [21, 22]. Pro přehlednost jsem provedla zatřídění také dle dnes již neplatné ČSN 73 1001 [23].

Vzorek byl nejdříve zvážen na váze, poté 24 hodin sušen v sušárně a zvážen znovu. Následně byl vzorek vložen do přístroje a došlo k jeho prosévání jednotlivými sítí. Struktura vzorku před vysušením je znázorněna na Foto 5.50.



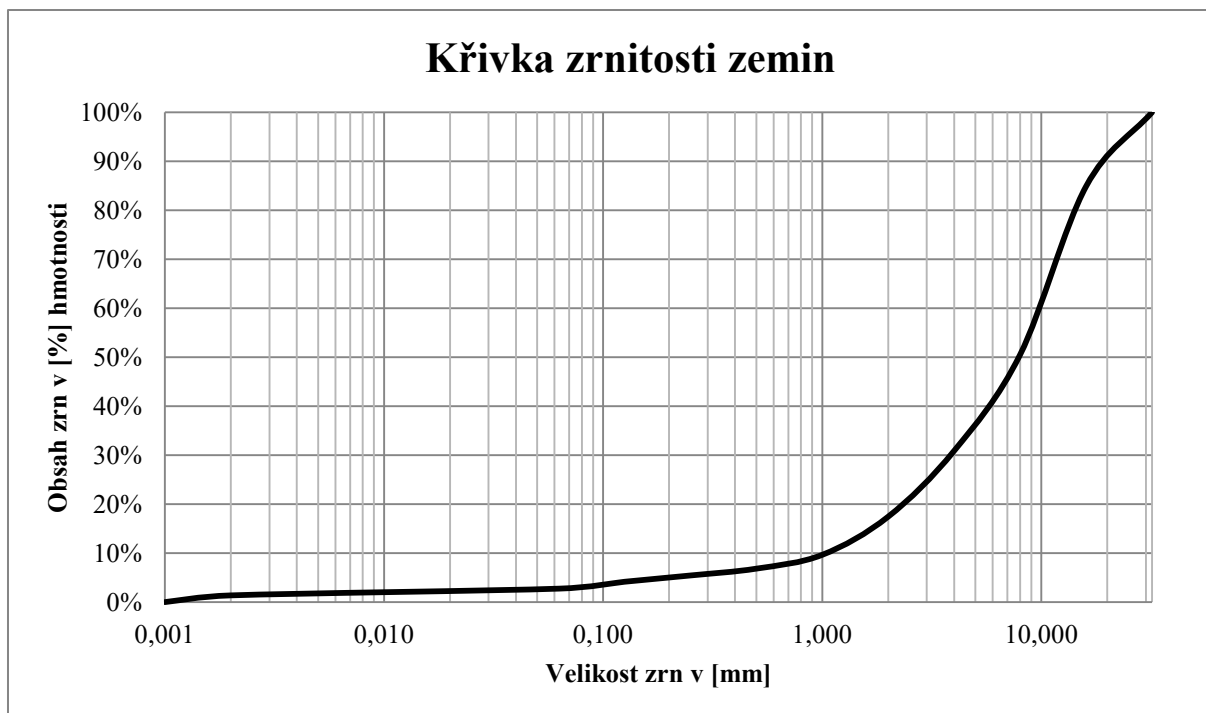
Foto 5.50: Vzorek povrchové suti pro síťový rozbor [Foto autora]

Vzhledem k celkové hmotnosti vysušeného vzorku jej bylo nutné pro provedení zkoušky rozdělit na 2 části, jejichž výsledky jsem následně sečetla. V následující Tab. 5.8 jsou uvedeny výsledky síťového rozboru, tedy celkové hmotnostní propady pro jednotlivá síta. Celková hmotnost vysušeného vzorku byla 2864 g.

Velikost oka síta [mm]	Propad materiálu na sítu [g]
32	433,26
16	984,28
8	562,34
4	385,10
2	223,22
1	80,91
0,5	39,84
0,25	36,84
0,125	40,13
0,063	39,48
0,002	39,30
0,001	0,00

Tab. 5.8: Výsledky síťového rozboru vzorku povrchové suti

Z výsledků uvedených v Tab. 5.8 jsem následně sestavila následující Graf 5.3 znázorňující křivku zrnitosti odebraného vzorku suti.



Graf 5.3: Křivka zrnitosti odebraného vzorku povrchové suti

Obsah jemnozrnných částic v celkovém vzorku je 2,75 %, obsah písčité frakce pak nabývá 14,69 % a obsah šterkovité frakce je 82,56 %. Vzhledem k již zmíněnému vymývání jemnozrnné jílovité frakce vlivem kolísání vody v nádrži, je obsah jílovitých částic v celém vzorku pouze 1,37 %. Tento proces je výrazně ovlivněn denním charakterem kolísání hladiny vody v nádrži.

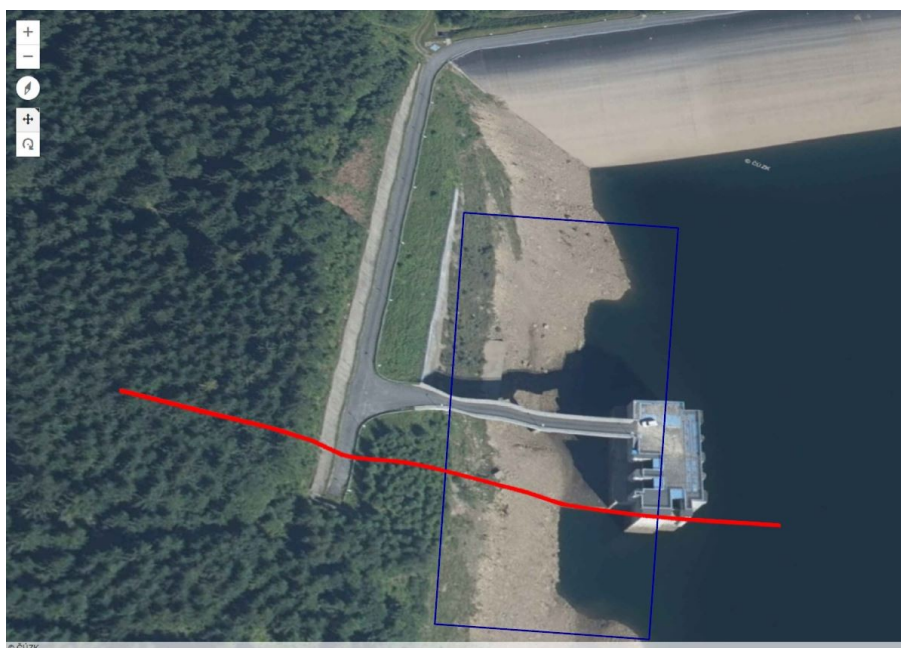
Opět je nutné zdůraznit, že výsledky znázorněné křivkou zrnitosti lze vztahovat jen k dané oblasti, odkud byl vzorek odebrán (viz Obr. 4.9), v jiných částech břehů mohou být vlastnosti odlišné.

Vzorek byl zařazen dle ČSN EN ISO 14688 mezi hrubozrnné zeminy s označením Gr – šterk. Dle ČSN 73 1001 byl vzorek zařazen do skupiny GW (G1) – šterk dobře zrněný. Při pohledu na předcházející Foto 5.50 lze také vidět, že vzorek je tvořen ostrohrannými úlomky.

6. Návrh sanace a protierozních opatření vybraného kritického úseku s využitím stabilitních výpočtů

V této kapitole je posouzena stabilita stávajícího svahu a následně navržena sanace a protierozní opatření pro konkrétní oblast na levém břehovém pásmu v blízkosti sdruženého objektu. V této oblasti svahů dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně je postup eroze břehového pásma nejhorší, zejména kvůli provedení zářezu do horninového masivu při výstavbě sdruženého objektu.

Konkrétní umístění řezu svahem levého břehového pásma, pro který jsou následně modelovány stabilitní výpočty, je uveden na následujícím Obr. 6.12. Z porušené oblasti za sdruženým objektem byl tento úsek vybrán kvůli svému nejprudšímu průběhu, tedy jako nejméně příznivá situace. Modře je pak ohraničena oblast aplikace sanačních a protierozních opatření.



Obr. 6.12: Modelovaný řez svahem levého břehového pásma s rozsahem opatření [11]

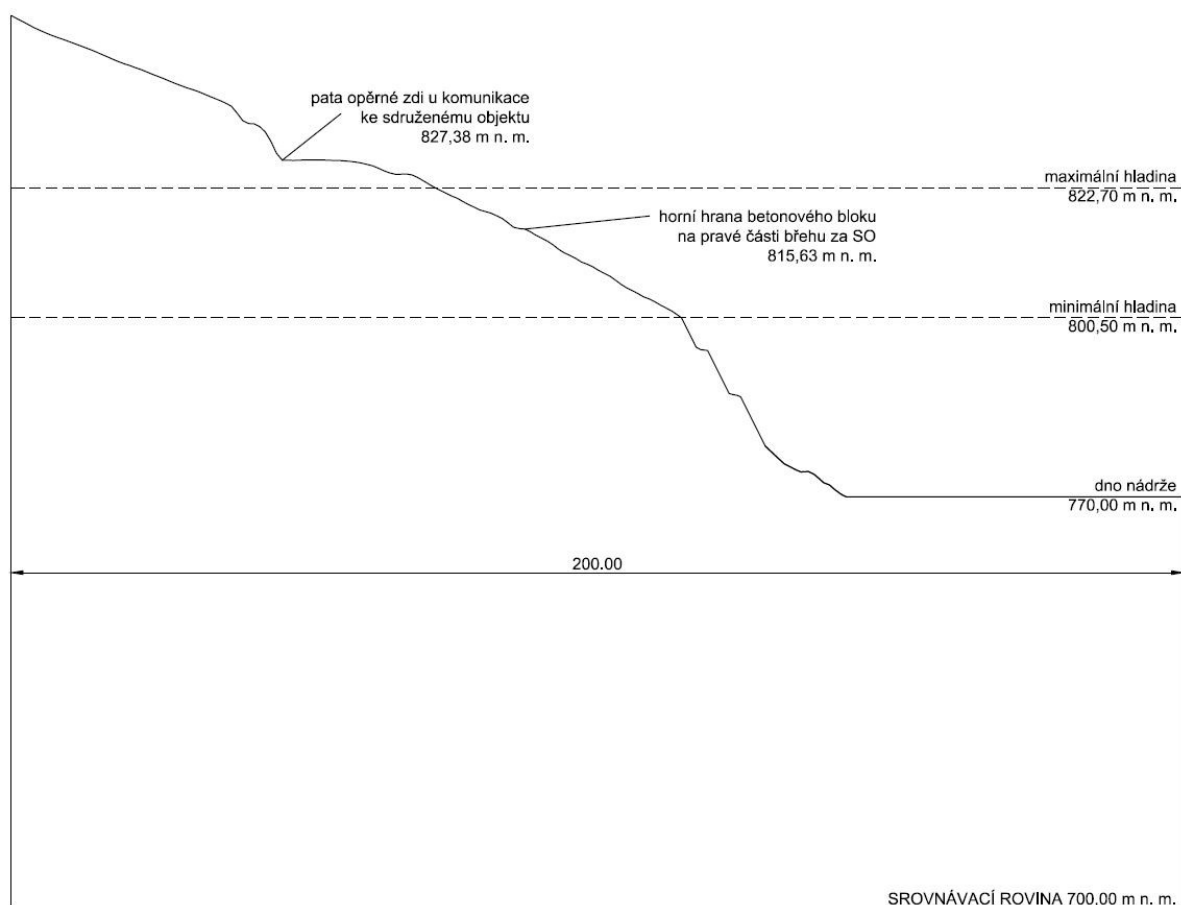
Parametry hornin a zemin pro modelování stabilitních výpočtů byly stanoveny s ohledem na výsledky provedených laboratorních zkoušek (viz kapitola 5 této práce) a konzultovány s vedoucí diplomové práce.

Vzhledem ke kolísání hladiny vody v nádrži mezi maximální hladinou v nadmořské výšce 822,70 m n. m. a minimální provozní hladinou ve výšce 800,50 m n. m., je v modelu simulován pokles hladiny mezi těmito výškami pro zjištění vlivu tohoto procesu na stabilitu

svahu. Dále je modelována hladina vody v nadmořské výšce 770,00 m n. m., na kterou má být nádrž vypuštěna pro provádění sanací a protierozních opatření.

6.1. Model stávajícího stavu

S ohledem na provedené zkoušky pevnosti v prostém tlaku, dle kterých byly horniny zařazeny do třídy R2, je modelovaná oblast horninového masivu řazena raději do třídy R3. K tomuto rozhodnutí bylo přikročeno po zhodnocení situace pod hladinou vody v nádrži, kde je horninový masiv porušen více, než v oblasti s kolísajícím charakterem vodní hladiny, kde došlo k odběru vzorků pro dané laboratorní zkoušky. Horninový masiv dále od břehu nabývá pevnosti dle třídy R2, ovšem v modelu není tato část vůbec uvažována. Vrstva povrchové suti je pak řazena dle pevnosti do třídy R5 s velmi nízkou pevností. Její mocnost je proměnlivá, dosahující 0,5 m na části břehu v rozmezí kolísání hladiny vody. Na strmé části svahu pod minimální hladinou vody se její mocnost poté výrazně zvyšuje vlivem ukládání sesunutých úlomků. Na následujícím Obr. 6.13 je uvedeno orientační schéma povrchu svahu.



Obr. 6.13: Schéma stávajícího stavu řešené části svahu

Vzhledem ke značné tektonické porušenosti horninového masivu a přítomnosti vertikálních zlomů byly stanoveny hodnoty koeficientů hydraulické vodivosti k_x a k_y v totožné hodnotě pro celou oblast horninového masivu v modelu.

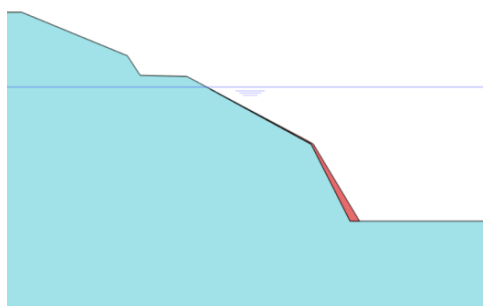
V následující Tab. 6.9 jsou uvedeny parametry použitých typů hornin pro modelování stávajícího stavu vybraného úseku svahu.

	R3 horninový masiv	R5 povrchová sut'
Material model	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Drainage type	Undrained (A)	Undrained (A)
γ [kN/m ³]	26,00	24,00
E_{def} [kN/m ²]	1 500 000	375 000
ν [-]	0,2	0,2
c [kPa]	100,0	1,5
φ [°]	43,00	37,00
$k_x = k_y$ [m/s]	0,0001	0,0005

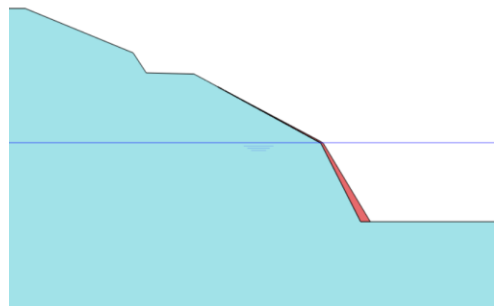
Tab. 6.9: Parametry hornin pro stávající stav modelu svahu

Model stávajícího stavu se skládá z fáze iniciační a 4 dalších fází. Charakteristika modelovaných situací s grafickým zobrazením je následující:

- **situace 1** pro stávající svah tvořený horninovým masivem R3 a povrchovou vrstvou suti R5 s maximální hladinou vody v nádrži (822,70 m n. m.), je tvořena **fází 1** pro plastický výpočet a **fází 2** pro stabilitní posouzení,
- **situace 2** pro stávající svah tvořený horninovým masivem R3 a povrchovou vrstvou suti R5 s minimální provozní hladinou vody v nádrži (800,50 m n. m.), je tvořena **fází 3** pro plastický výpočet a **fází 4** pro stabilitní posouzení.



Obr. 6.14: Situace 1 stávajícího stavu



Obr. 6.15: Situace 2 stávajícího stavu

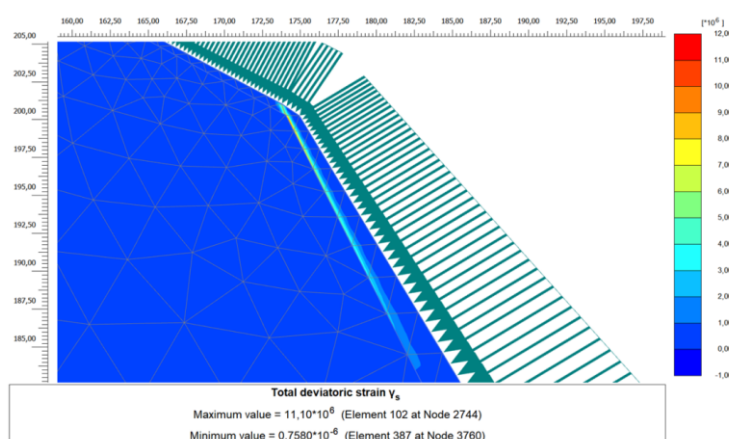
Při srovnání výsledků obou situací v následující Tab. 6.10 lze jasně vidět, že vyšší hladina vody v nádrži stabilitě svahu z hlediska zatížení přispívá a škodí mu její následné snižování, a to zejména v zimním období, kdy následně dochází ke vzniku tzv. mrazových klínů.

Ovšem v obou případech je nutné říci, že nynější svah není stabilní a je nutné přistoupit k aplikaci opatření. Na nestabilitu svahu má vliv hlavně neustále se tvořící povrchová vrstva suti a její postupné sesuvy na dno nádrže.

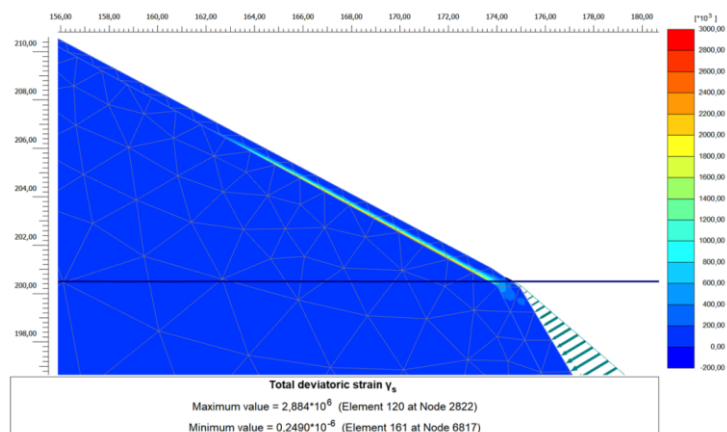
	Situace 1	Situace 2
Stupeň stability	0,9937	0,9352
Čerpání pevnosti τ_{rel} [%]	100	100
Totální posun u_x [m]	0,01245	0,01846
Totální posun u_y [m]	-0,01643	-0,02766
Totální napětí σ_{xx} [kN/m²]	-3505	-3438
Totální napětí σ_{yy} [kN/m²]	-6439	-6402

Tab. 6.10: Srovnání výsledků situací stávajícího stavu

Vývoj smykových ploch je zobrazen na následujících Obr. 6.16 a Obr. 6.17. Zatímco u situace 1 se kritická smyková plocha nachází na rozmezí mezi vrstvou povrchové suti a horninového masivu na strmější části svahu pod minimální hladinou vody, u situace 2 lze pozorovat kritickou smykovou plochu na rozmezí vrstev v mírnější části svahu nad minimální hladinou vody.

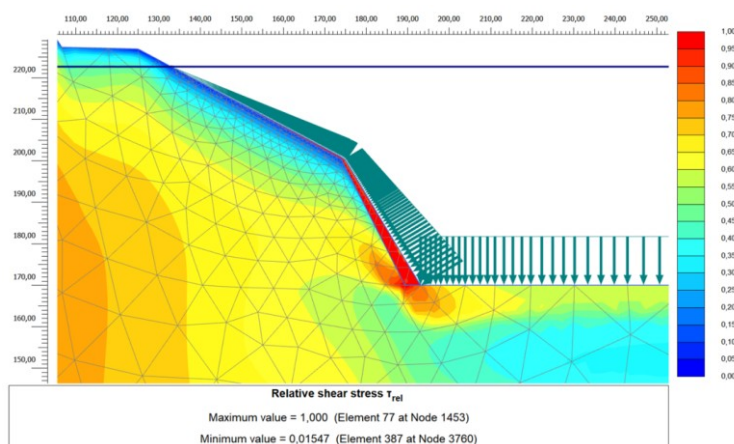


Obr. 6.16: Smyková plocha pro situaci 1

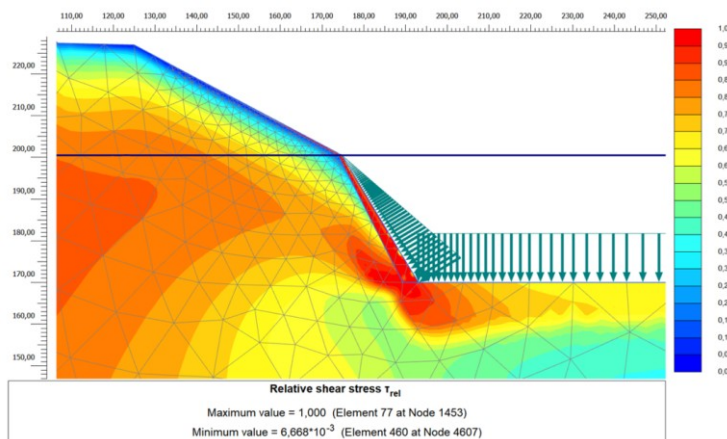


Obr. 6.17: Smyková plocha pro situaci 2

Na následujících Obr. 6.18 a Obr. 6.19 je zobrazeno čerpání pevnosti pro jednotlivé situace, kdy u obou je směřováno do paty svahu a vrstvy povrchové suti, ovšem u situace 2 s minimální hladinou vody je čerpání pevnosti daleko výraznější. V obou případech je pevnost čerpána na maximum, tedy na 100 %.

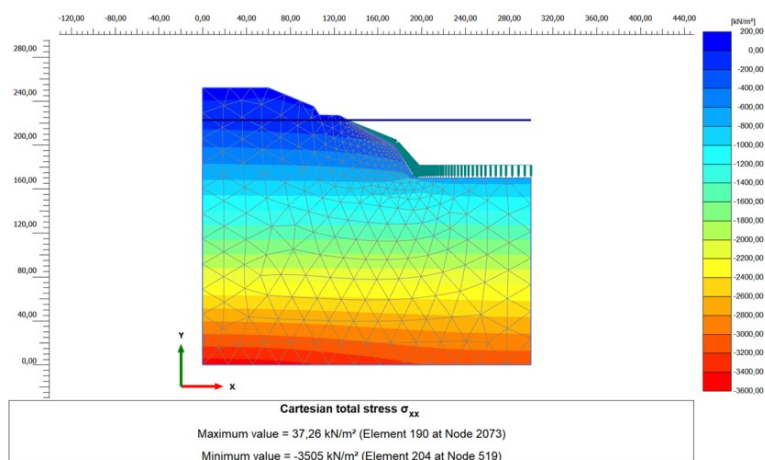


Obr. 6.18: Čerpání pevnosti pro situaci 1

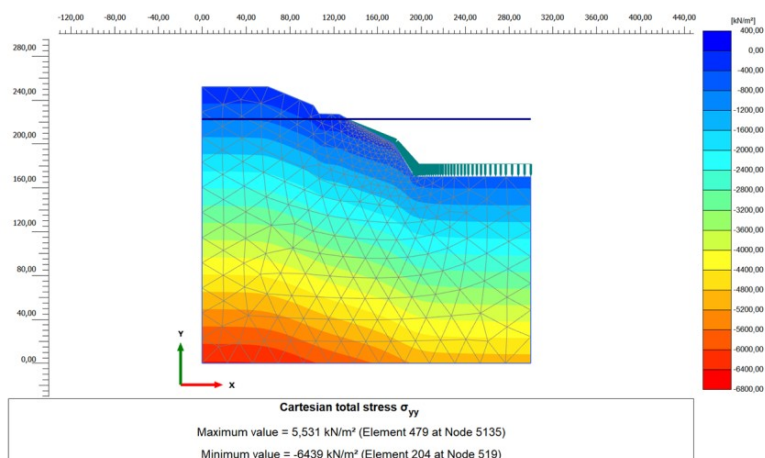


Obr. 6.19: Čerpání pevnosti pro situaci 2

Vývoj totálních napětí je zobrazen na následujících Obr. 6.20 a Obr. 6.21. Vzhledem k tomu, že vývoj napětí je u obou situací velmi obdobný, uvádím dále pouze grafické výstupy situace 1, která je pro svah více nepříznivá.



Obr. 6.20: Totální napětí pro situaci 1 ve směru osy x



Obr. 6.21: Totální napětí pro situaci 1 ve směru osy y

6.2. Návrh sanace a protierozních opatření

Vzhledem k prokázané nestabilitě stávajícího svahu v předchozí kapitole 6.1, je v této kapitole proveden návrh sanace stávajícího stavu a aplikace protierozních opatření, které sníží porušování horninového masivu a v ideálním případě zabrání jeho erozi. Rozsah sanačních a protierozních opatření na levém břehu dolní nádrže za sdruženým objektem je znázorněn na předcházejícím Obr. 6.12.

Návrh je založen na předchozí dobré zkušenosti s aplikací gabionových matic na pravém břehu v těsné blízkosti hráze a dále na umístění stavby v CHKO Jeseníky, kdy je preferována konstrukce, která příliš nenarušuje okolní ráz přírodní krajiny.

Pro aplikaci opatření je nejdříve nutné snížit hladinu vody v nádrži na 770,00 m n. m., což znamená stabilitní problém pro strmý svah původního zářezu, který je od napuštění dolní nádrže permanentně pod vodou. Při tomto snížení hladiny je také plánováno odtěžení nánosů jílovitých částic ze dna nádrže a návodního líce hráze a dále také vybudování přehrážky na konci zátopové oblasti. V případě odtěžení nánosů je třeba počítat s možnými problémy vyplývajícími ze změny stability, jelikož dojde k odlehčení paty již nestabilního svahu.

Sanační opatření poté spočívají v demolici již nefunkčního betonového bloku umístěného ve výšce 815,63 m n. m. na pravé straně za sdruženým objektem o objemu přibližně 221,5 m³, dále v odstranění narušených skalních výčnělků a volných nestabilních bloků strmého svahu horolezeckým způsobem o předpokládaném objemu 237,6 m³ a poté také v odtěžení nejnarušenější vrstvy povrchové suti o objemu 321,0 m³.

Strmá část svahu pod minimální provozní hladinou vody bude upravena nejlépe do sklonu 3:1, pokud to bude možné vzhledem k velikosti horninových bloků a stavu svahu. Poté budou aplikovány stabilizační opatření ve formě gabionových konstrukcí typu Terramesh system (výrobce Maccaferri) do výšky 800,50 m n. m., které budou ukotveny do masivu kotvami délky 5 m.

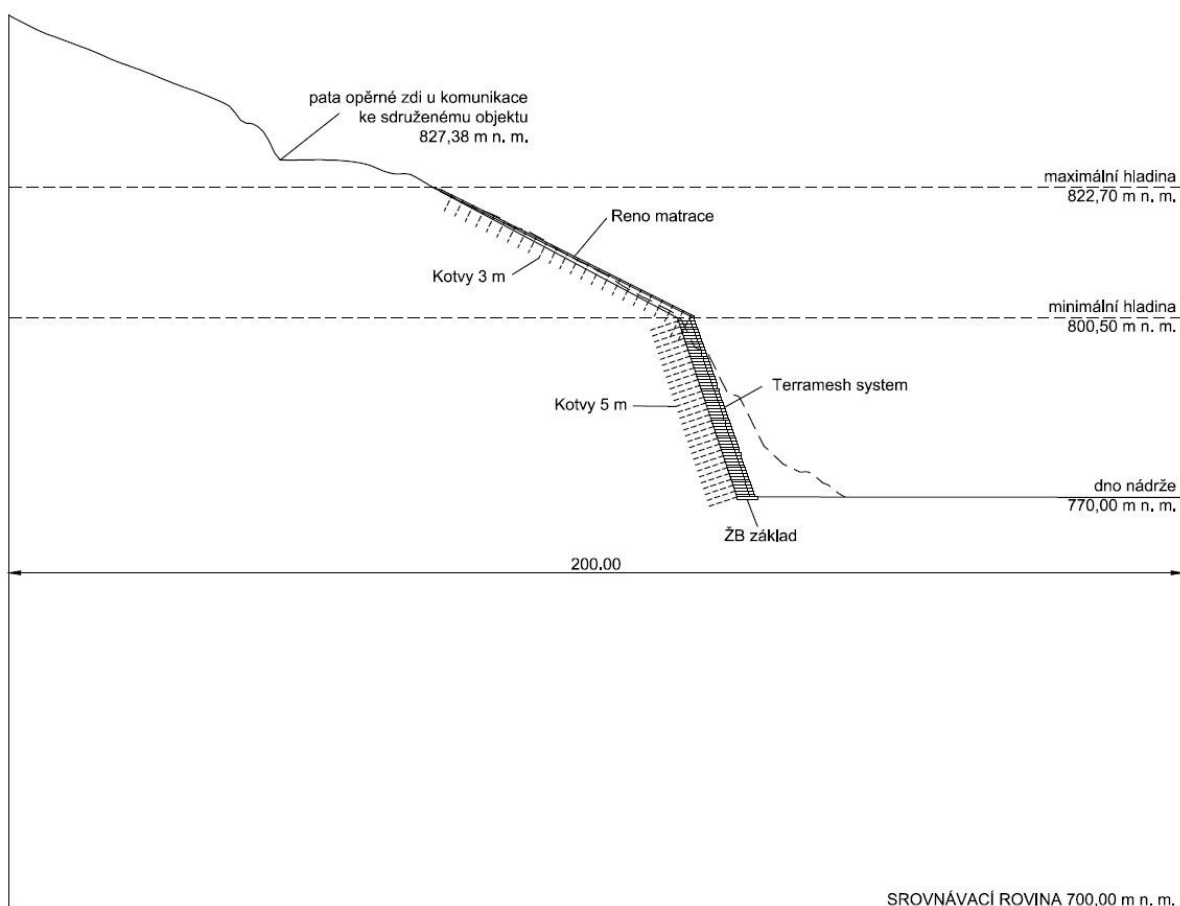
Méně strmý svah v rozmezí minimální a maximální hladiny vody bude upraven nejlépe do sklonu 1:2, pokud to bude možné vzhledem k velikosti úlomků a stavu svahu. Poté na něj budou aplikovány gabionové konstrukce typu Reno matrace (výrobce Maccaferri), které budou navazovat na gabionové konstrukce strmější části svahu a budou do horninového masivu kotveny kotvami délky 2 m.

Mezi oběma konstrukcemi a horninovým masivem bude proveden zásyp, který bude od gabionových konstrukcí oddělen separační geotextilií s gramáží 100 g/m². Zásyp bude hutněn po vrstvách 250 mm.

Pro zásypový a výplňový materiál gabionových konstrukcí budou ideálně použity úlomky odtěženého horninového materiálu ze svahu a dna nádrže, které mají vyhovující pevnostní vlastnosti, což bylo prokázáno pomocí provedených laboratorních zkoušek, jejichž výsledky jsou uvedeny v předchozí kapitole 5. Při nedostatku materiálu je předpokládáno doplnění dovezeným lomovým kamenem.

Pro novou konstrukci budou také vybudovány 2 železobetonové základy z betonu C35/45 – XA3 o rozměrech 0,5x3,5 m v délkách 24 a 35 m, které budou taktéž ukotveny do horninového masivu, a to konkrétně pomocí ocelových mikropilot průměru 89/10 mm.

Orientační umístění konstrukcí je uvedeno na následujícím Obr. 6.22.



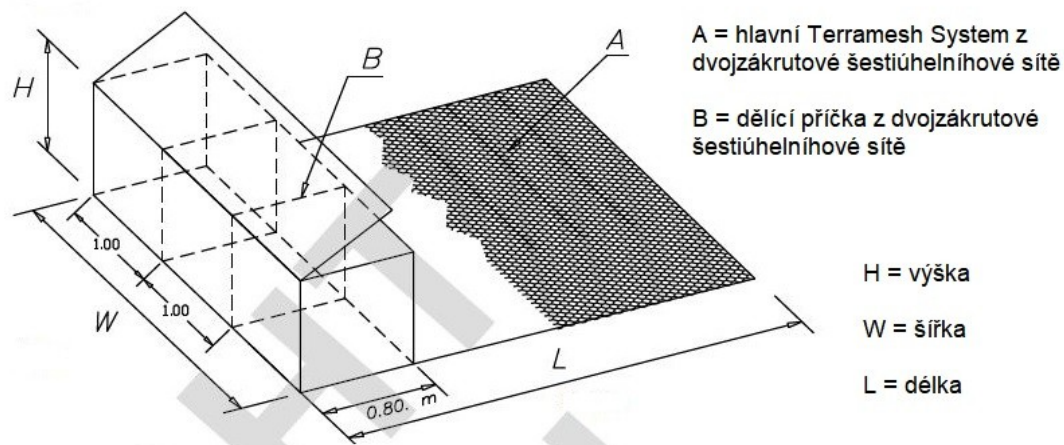
Obr. 6.22: Schéma stabilizačního opatření řešené části svahu

Terramesh system je stavební systém tvořený dvojzákrutovou ocelovou sítí s antikorozi povrchovou ochranou. Čelní část bloku tvoří spojení přilehlých stěn s dělicím panelem do jednoho celku. Tímto způsobem dochází k vytvoření pravoúhlé buňky, která je následně vyplněna kamenivem. Schéma navrhované konstrukce je uvedeno na následujícím Obr. 6.23 a její parametry jsou uvedeny v následující Tab. 6.11. Pro navržené stabilizační opatření má být použito 1 298 kusů košů a 3 634,4 m³ výplňového kameniva frakce 125 až 200 mm.

	Terramesh system	Reno matrace
Délka L [m]	3,00	3,00
Šířka W [m]	2,00	2,00
Výška H [m]	0,50	0,30
Typ sítě [mm]	80x100	60x80
Průměr drátu [mm]	2,7/3,5	2,7/3,5
Typ spojení bloků	C kroužky	C kroužky

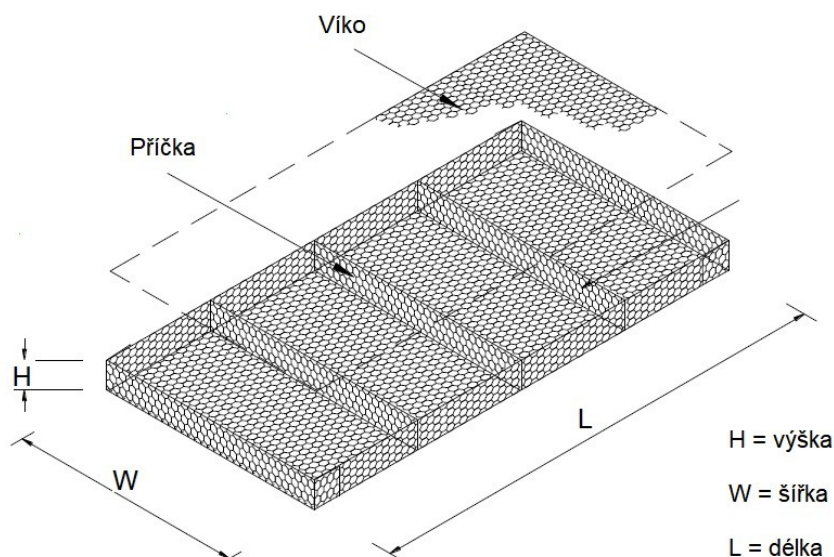
Frakce výplňového kameniva [mm]	125 až 200	125 až 200
---------------------------------	------------	------------

Tab. 6.11: Navrhované rozměry gabionových konstrukcí (výrobce Maccaferri) [26]



Obr. 6.23: Terramesh system (výrobce Maccaferri) [26]

Reno matrace jsou konstrukční prvky tvořené dvojzákrutovou ocelovou sítí typu 60x80 mm s antikorozií povrchovou ochranou. Reno matrace jsou rozděleny na jednotlivé buňky vnitřními příčkami. Schéma navrhované konstrukce je uvedeno na následujícím Obr. 6.24 a její parametry jsou uvedeny v předchozí Tab. 6.11. Pro navržené stabilizační opatření má být použito 281 kusů košů a 504,8 m³ výplňového kameniva frakce 125 až 200 mm.



Obr. 6.24: Reno matrace (výrobce Maccaferri) [26]

Pro kotvení gabionových konstrukcí do horninového masivu jsou použity zavrtávací injekční tyče průměru 32 mm z oceli třídy S 670 H do vrtu průměru 51 mm s fixací cementovou zálivkou. Kotvy jsou aplikovány v délce 5 m pro Terramesh system o rozpětí 1 m a v předpokládaném množství 649 kusů. Aplikace kotev délky 3 m pro Reno matrace v rozpětí 2 m je pak předpokládána v počtu 562 kusů. V místě přechodu gabionových konstrukcí z Terramesh system na Reno matrace jsou aplikovány 2 kotvy proměnné délky dle zastižených podmínek a realizované mocnosti zásypu.

V následující Tab. 6.12 jsou uvedeny parametry použitých typů konstrukcí pro modelování stabilitního opatření vybraného úseku svahu, parametry hornin zůstávají stejné (viz předchozí Tab. 6.9). Materiál G1 kamenivo je aplikován na výplň gabionových konstrukcí, materiál G1 zásyp pak na zásyp mezi gabionovými konstrukcemi a horninovým masivem a materiál Betonový základ pro simulaci tvorby železobetonového základu pod gabionovými konstrukcemi.

	G1 kamenivo	G1 zásyp	Betonový základ
Material model	Linear Elastic	Linear Elastic	Linear Elastic
Drainage type	Drained	Drained	Non-porous
γ [kN/m ³]	22,00	21,00	24,00
E_{def} [kN/m ²]	310 000	250 000	-
E [kN/m ²]	-	-	35 000
ν [-]	0,2	0,2	0,2
$k_x = k_y$ [m/s]	0,001	0,001	-

Tab. 6.12: Parametry konstrukcí pro stabilitní opatření modelu svahu

Vzhledem k tomu, že v případě Mohr-Coulombova modelu mi nové gabionové konstrukce kolabovaly, zvolila jsem pro materiály G1 kamenivo a G1 zásyp následně model Linear Elastic. I poté ale bylo nutné dále namodelovat 3 další výztužné prvky. Jejich parametry jsou uvedeny v následující Tab. 6.13 a jejich výčet je následující:

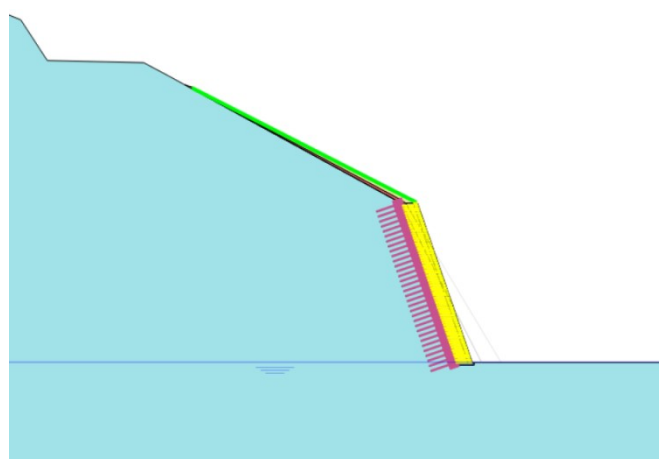
- vodorovné prvky pro simulaci podélné sítě systému Terramesh system, pomocí liniového prvku Geogrid,
- vodorovné prvky pro simulaci spodní a horní vrstvy sítě systému Reno matrace, pomocí liniového prvku Geogrid,
- ukotvení konců podélné sítě systému Terramesh system, pomocí liniového prvku Embedded beam row.

	Kotva	Terramesh system	Reno matrace
Set type	Embedded beam row	Geogrid	Geogrid
Material type	Elastic	Elastic	Elastic
Isotropic	-	Ano	Ano
EA [kN/m]	-	50,00	37,00
E [kN/m ²]	670 000	-	-
Diameter [m]	0,032	-	-
L _{spacing} [m]	1,0	-	-

Tab. 6.13: Parametry přidáných liniových prvků

Model stabilizního opatření se skládá z fáze iniciační a 10 dalších fází. Charakteristika modelovaných situací s grafickým zobrazením je následující:

- **situace 1** pro stávající svah tvořený horninovým masivem R3 a povrchovou vrstvou suti R5 s vypuštěnou vodou v nádrži (770,00 m n. m.), je tvořena **fází 1** pro plastický výpočet a **fází 2** pro stabilitní posouzení,
- **situace 2** pro upravený povrch svahu s vypuštěnou vodou v nádrži (770,00 m n. m.), je tvořena **fází 3** pro plastický výpočet a **fází 4** pro stabilitní posouzení,
- **situace 3** pro aplikaci stabilizních opatření ve formě základu, gabionových konstrukcí, kotvení a výztužných vodorovných prvků s vypuštěnou vodou v nádrži (770,00 m n. m.), je tvořena **fází 5** pro plastický výpočet a **fází 6** pro stabilitní posouzení,

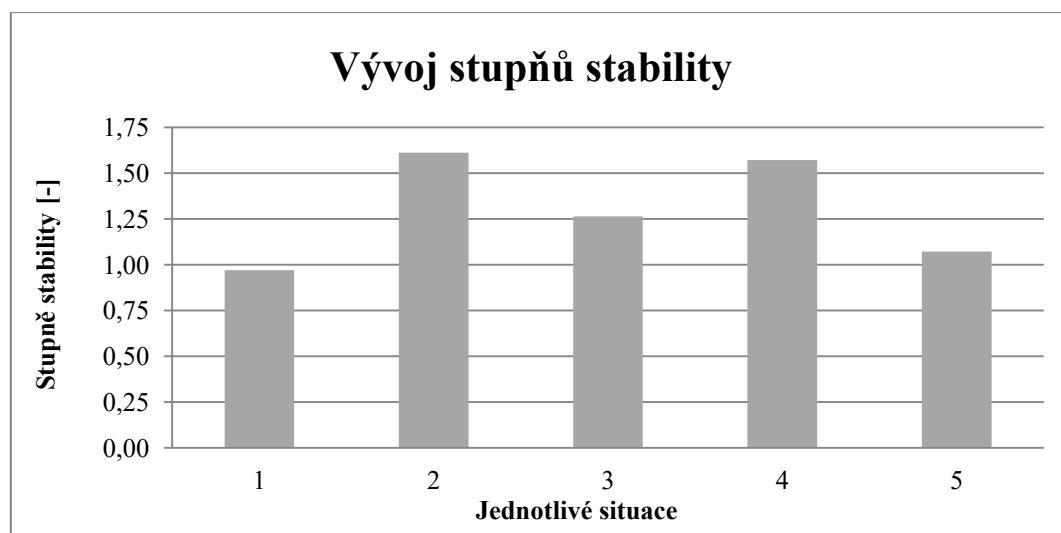


Obr. 6.25: Situace 3 aplikace stabilizních opatření

- **situace 4** pro napuštění vody do maximální hladiny v nádrži (822,70 m n. m.), je tvořena **fází 7** pro plastický výpočet a **fází 8** pro stabilitní posouzení,

- **situace 5** pro pokles hladiny vody v nádrži na minimální provozní úroveň (800,50 m n. m.), je tvořena **fází 9** pro plastický výpočet a **fází 10** pro stabilitní posouzení.

Při srovnání stupňů stability těchto situací v následujícím Graf 6.4 lze sledovat skokovou tendenci stupňů stability jednotlivých situací.



Graf 6.4: Vývoj stupňů stability při aplikaci stabilitních opatření

Svah stávajícího svahu pro situaci 1 je nestabilní, čímž je vyjádřena potřeba aplikace opatření pro zvýšení stability tohoto svahu.

Stupeň stability stoupá pro situaci 2, kdy dochází k očištění svahu od volných a narušených bloků. Tento stav je způsoben zejména skutečností, že samotný horninový masiv je dostatečně pevný, ovšem tento stav nemá trvalý charakter při působení klimatických podmínek spolu s kolísáním vody v nádrži, jak je doloženo stávajícím stavem.

Při aplikaci stabilitních opatření ve formě realizace gabionových konstrukcí pak dochází ke snížení stupně stability. Tento stav je způsoben zejména značným zjednodušením modelu pro výpočet, kdy nebyly aplikovány všechny zajišťovací konstrukce, konkrétně u gabionových konstrukcí typu Terramesh system nebyly modelovány svislé výztužné prvky a u gabionových konstrukcí typu Reno matrace pak kotvení do horninového masivu. Domnívám se tedy, že výpočtem v programech přímo určených pro dané konstrukce (výrobce Maccaferri jich má pro své konstrukce několik) by bylo dosaženo příznivějšího výsledku.

Při pohledu na stupně stability pro situace 4 a 5 je opět potvrzen předpoklad, že vyšší hladina vody v nádrži stabilitě svahu z hlediska zatížení přispívá a škodí mu její následné snižování, a to hlavně vlivem klimatických podmínek. V zimním období totiž teplota v oblasti dolní nádrže klesá nezdědky i na -20 °C.

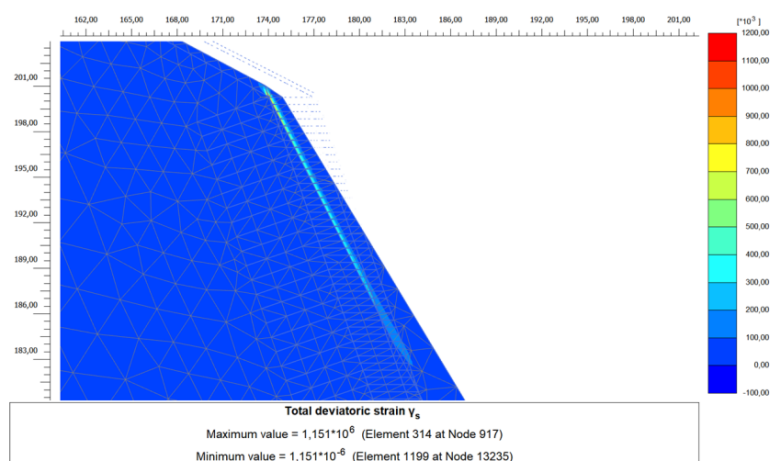
Stupeň stability sice vychází pro situaci 5 velmi nízký, prakticky na hranici označení svahu stabilním. Ovšem jak jsem již zmiňovala dříve, domnívám se, že s aplikací zajišťovacích opatření, která nejsou modelována, bude skutečný stupeň stability daleko vyšší a svah bude při kolísání hladiny vody v nádrži dlouhodobě stabilní.

V následující Tab. 6.14 je uvedeno srovnání vybraných výsledků jednotlivých situací.

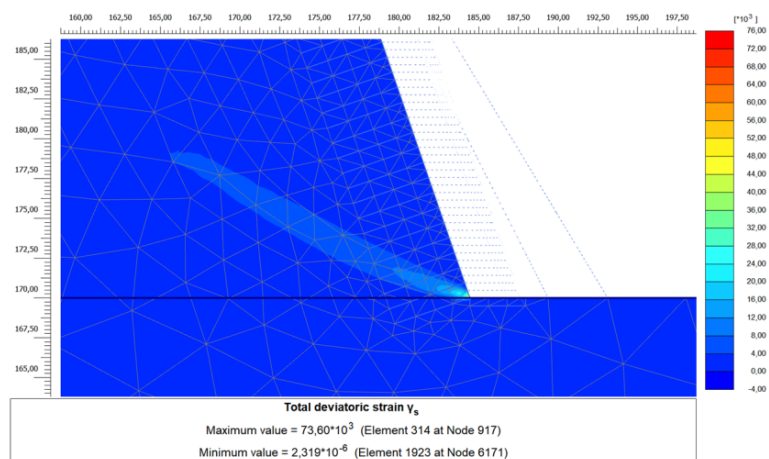
	Situace 1	Situace 2	Situace 3	Situace 4	Situace 5
Stupeň stability	0,9710	1,612	1,264	1,572	1,072
Čerpání pevnosti τ_{rel} [%]	100	100	100	100	100
Totální posun u_x [m]	0,01788	0,01616	0,01884	0,01549	0,00481
Totální posun u_y [m]	0,01394	0,01372	0,01392	0,01079	0,00414
Totální napětí σ_{xx} [kN/m²]	-3132	-3127	-3131	-3264	-3197
Totální napětí σ_{yy} [kN/m²]	-6423	-6418	-6423	-6478	-6442

Tab. 6.14: Srovnání výsledků situací při aplikaci stabilitního opatření

Vývoj kritických smykových ploch je zobrazen na následujících Obr. 6.26 až Obr. 6.30. Zatímco u situace 1 se kritická smyková plocha nachází na rozmezí mezi vrstvou povrchové suti a horninového masivu na strmější části svahu pod minimální hladinou vody, u situace 2 lze pozorovat kritickou smykovou plochu v patě očištěného svahu.

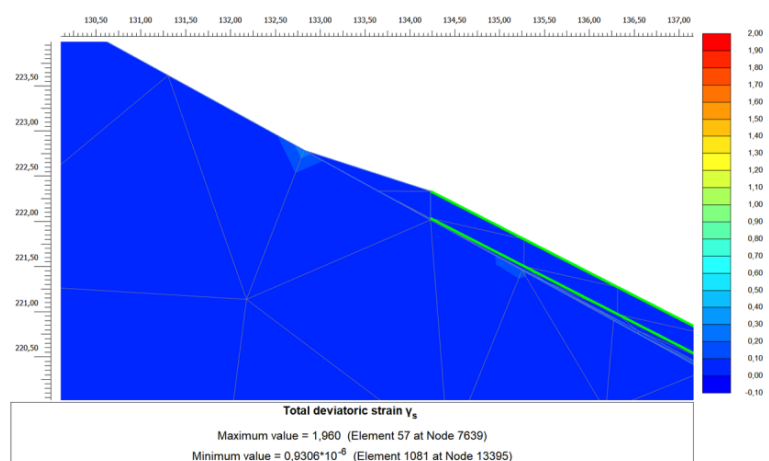


Obr. 6.26: Smyková plocha pro situaci 1

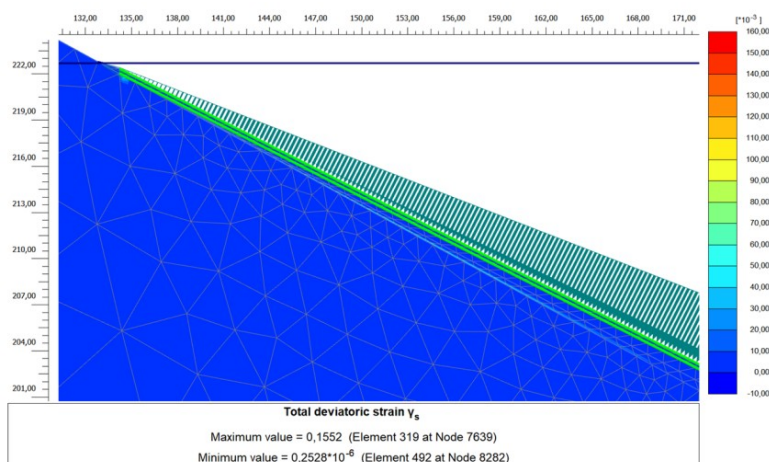


Obr. 6.27: Smyková plocha pro situaci 2

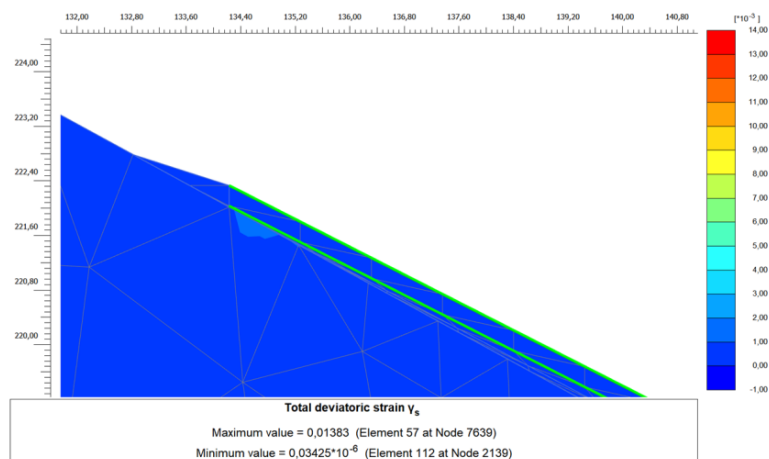
Pro další situace se smyková plocha tvoří na rozmezí vrstev v mírnější části svahu nad minimální hladinou vody, kdy pro situaci 3 a 5 je lokalizována na konci gabionové konstrukce typu Reno matrace a pro situaci 4 se vyskytuje zhruba po celé její délce.



Obr. 6.28: Smyková plocha pro situaci 3



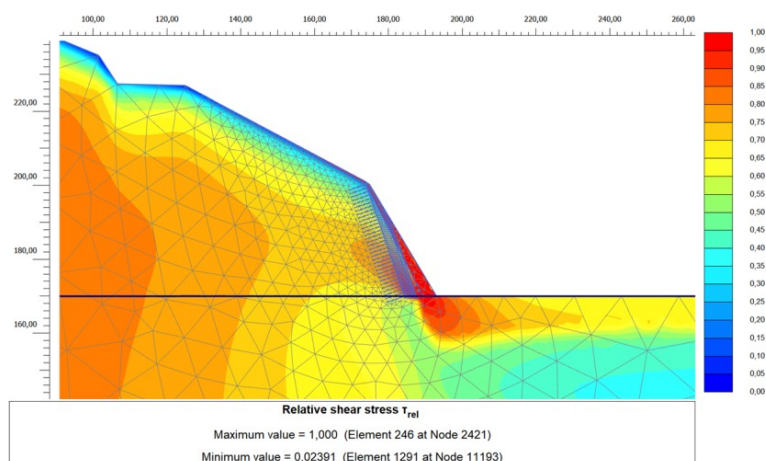
Obr. 6.29: Smyková plocha pro situaci 4



Obr. 6.30: Smyková plocha pro situaci 5

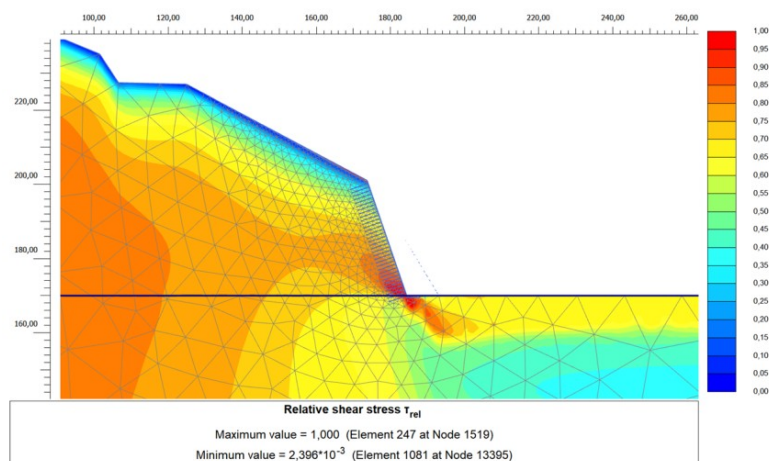
Na následujících Obr. 6.31 a Obr. 6.35 je zobrazeno čerpání pevnosti pro jednotlivé situace. Ve všech případech je pevnost čerpána na maximum, tedy na 100 %.

Pro situaci 1 je maximální čerpání lokalizováno do paty svahu, konkrétně do vrstvy povrchové suti.



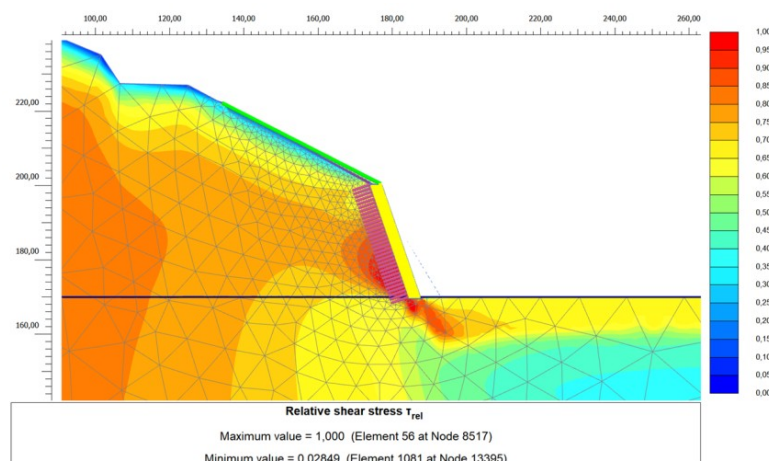
Obr. 6.31: Čerpání pevnosti pro situaci 1

V případě situace 2 lze maximální čerpání vidět v patě již očištěného svahu a v menším rozsahu, než pro situaci 1. Dále je maximální čerpání dosaženo ve vrstvě povrchové suti na méně strmé části svahu mezi minimální a maximální hladinou vody



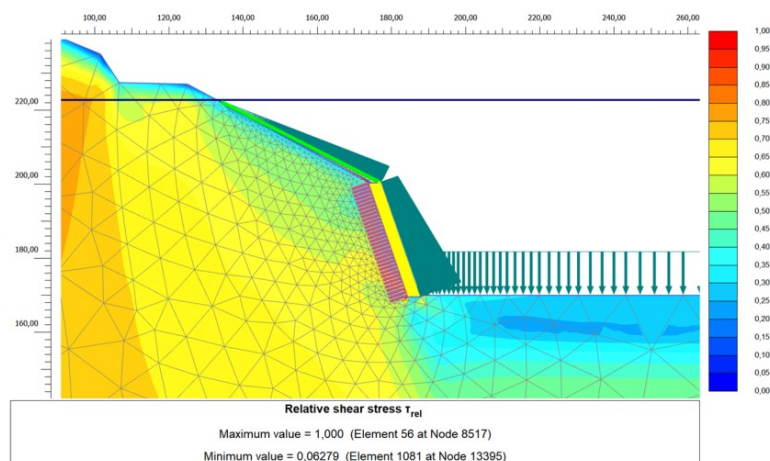
Obr. 6.32: Čerpání pevnosti pro situaci 2

Při aplikaci stabilitních opatření lze sledovat výrazný plošný nárůst čerpání pevnosti, která je opět lokalizována do paty očištěného svahu a ve vrstvě povrchové suti, která byla ponechána na méně strmé části svahu mezi minimální a maximální hladinou vody.



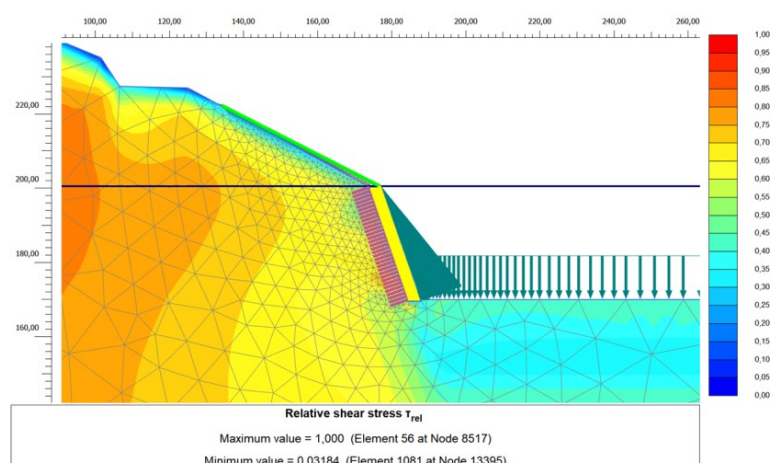
Obr. 6.33: Čerpání pevnosti pro situaci 3

Při přetížení svahu vodou, která byla v situaci 4 napuštěna do výšky maximální hladiny (822,70 m n. m.) lze vidět plošné snížení čerpání pevnosti oproti předchozí situaci 3. Čerpání pevnosti je lokalizováno v patě očištěného svahu a ve vrstvě povrchové suti, která byla ponechána na méně strmé části svahu mezi minimální a maximální hladinou vody.



Obr. 6.34: Čerpání pevnosti pro situaci 4

Při vypuštění nádrže na úroveň minimální provozní hladiny vody (800,50 m n. m.) snížení čerpání pevnosti v patě očištěného svahu na 85 %, ovšem ve vrstvě povrchové suti, která byla ponechána na méně strmé části svahu mezi minimální a maximální hladinou vody je stále lokálně dosahováno maximálního čerpání ve výši 100 %.

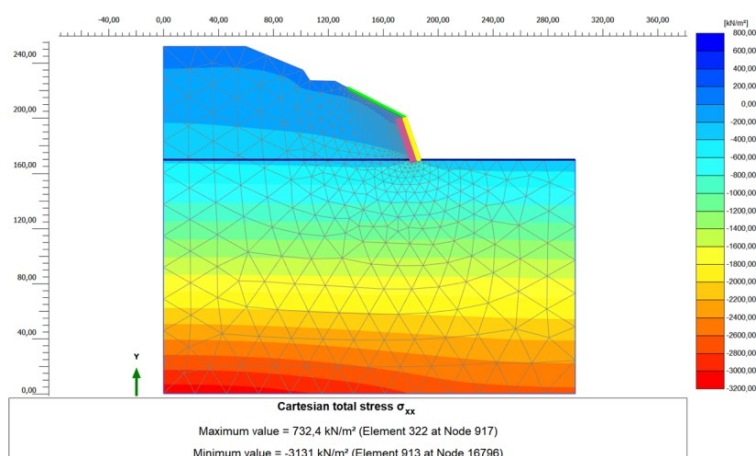


Obr. 6.35: Čerpání pevnosti pro situaci 5

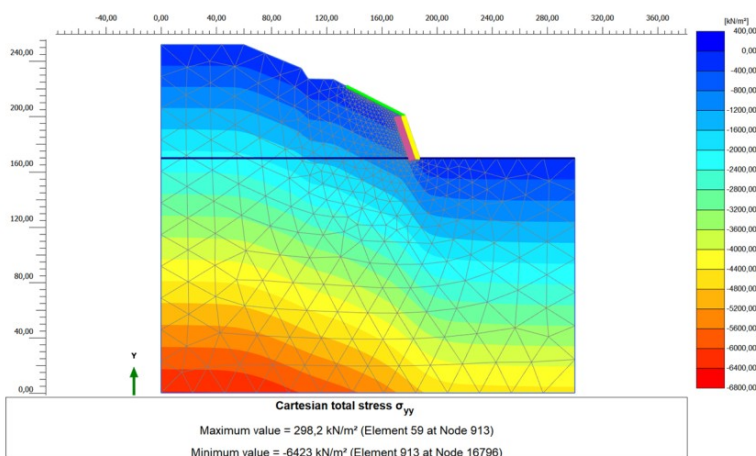
Při sledování vývoje napětí v modelovaných situacích je vidět, že uvedených maximálních hodnot totálních napětí svah dosahuje na své spodní modelované hranici, tedy ve výšce 600 m n. m.

Hodnoty v těsné blízkosti vnější hranice horninového svahu a následně aplikované konstrukce se pohybují pro σ_{xx} v rozmezí minimální hodnoty 35,29 kPa (pro situaci 2) až 732,4 kPa (pro situaci 3). Hodnoty v těsné blízkosti vnější hranice horninového svahu a následně aplikované konstrukce pro σ_{yy} se následně pohybují v rozmezí minimální hodnoty 46,45 kPa (pro situaci 2) až 324,9 kPa (pro situaci 5).

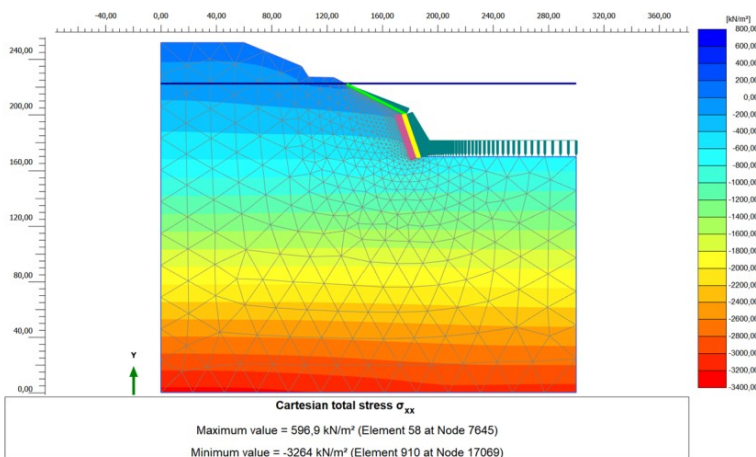
Průběh napětí v případě směru osy x je vodorovný, zatímco ve směru osy y kopíruje konstrukci. Znázornění průběhu je uvedeno na následujících Obr. 6.26 a Obr. 6.27 pro situaci 3 a Obr. 6.28 a Obr. 6.29 pro situaci 4.



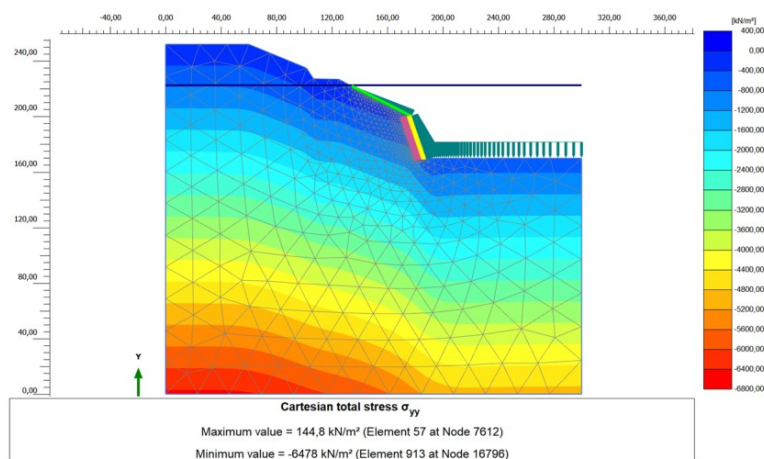
Obr. 6.36: Totální napětí pro situaci 3 ve směru osy x



Obr. 6.37: Totální napětí pro situaci 3 ve směru osy y



Obr. 6.38: Totální napětí pro situaci 4 ve směru osy x



Obr. 6.39: Totální napětí pro situaci 4 ve směru osy y

Celkové zhodnocení výsledků a diskuze k nim je uvedena v následující kapitole, konkrétně závěru celé diplomové práce.

7. Diskuze a závěr

Cílem práce bylo popsání problematiky zpevňování břehů vodních děl s důrazem na vliv kolísání hladiny vody v nich s konkrétním popisem situace břehových pásů dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně. V této konkrétní situaci bylo nutné zohlednit také náročné klimatické podmínky, jelikož celý komplex PVE Dlouhé Stráně je umístěn v pohorí Hrubý Jeseník a dolní nádrž pak ve výšce 824,70 m n. m. v koruně hráze.

Nejdříve byl zdokumentován a popsán stávající stav levého a pravého břehového pásma. Detailní popis včetně fotodokumentace je uveden v kapitole 4 této práce. Je nutné konstatovat, že stabilita svahů je výrazně narušena erozí horninového masivu v oblasti, který je způsoben zejména zmíněným kolísáním hladiny vody v nádrži a následně také působením klimatických vlivů.

Vzhledem ke značné tektonické porušenosti horninového masivu a přítomnosti vertikálních zlomů je vliv eroze o to výraznější. Z horninového masivu se uvolňují menší bloky, které se následně rozlamují na menší úlomky. Problémem jsou zejména klimatické podmínky. Voda se dostává do vrstev nespojitostí v horninovém masivu, kde následně dochází k jejímu mrznutí a vlivem rozpínání zde lze sledovat efekt mrazových klínů. Tímto způsobem dochází k dalšímu zvětšování stávajících trhlin v horninách a odlamování jejich částí.

Tímto je prakticky kontinuálně tvořena vrstva povrchové suti břehových pásů. V této vrstvě pak dochází k plouživým svahovým pohybům, které jsou způsobeny procesem nadlehčování a poté sklouzávání jednotlivých úlomků, ovšem v širším měřítku dochází takto k pohybům velké plochy povrchové suti. Proces opět značně ovlivňují klimatické podmínky. Úlomky jsou umístěny pod hladinou vody při napuštění maximální hladiny v nádrži (822,70 m n. m.), poté když je voda vypuštěna na minimální provozní hladinu (800,50 m n. m.) dochází k mrznutí zbytkové vody na povrchu úlomků, čímž na sebe úlomky nedosedají horninovou hmotou, ale touto zmrzlou vrstvou vody, která má tendenci se rozpínat. Při opětovném napuštění nádrže na maximální hladinu dochází ke zkapalnění této vody, čímž jsou úlomky nadlehčeny a dochází k jejich pozvolnému posunu do tělesa hráze.

Je nutné říci, že tyto posuny jsou velmi malé a je proto velmi obtížné je sledovat, nicméně při typu provozu PVE Dlouhé Stráně je jejich výskyt častý. Provoz PVE je prováděn ve 24 hodinových cyklech, kdy v ranních hodinách je v nádrži voda na minimální provozní

úrovni (800,50 m n. m.) a následně před den je dosaženo maximální hladiny vody (822,70 m n. m.) s následným přečerpáváním vody zpět do horní nádrže v nočních hodinách.

Obecně lze konstatovat, že eroze břehů po celém obvodu dolní nádrže je velmi pokročilá a ohrožuje stabilitu okolních stromů. Nejhorší oblastí pravého břehového pásma je oblast svahu nejbližší k přilehlé komunikaci, která je stěžejní pro obsluhu horní nádrže, provoz techniky pro odtěžování stromů z vyšších částí přilehlých svahů a také pro turistický ruch. Eroze levého břehového pásma je pak nejvýraznější v oblasti za sdruženým objektem, kde byl pro jeho výstavbu proveden zářez do horninového masivu. Této oblasti se také věnuji při návrhu sanace a protierozních opatření.

Pro zjištění parametrů horninového masivu byly odebrány z této oblasti vzorky hornin, které byly následně podrobeny laboratorním zkouškám na nasákavost, mrazuvzdornost a pevnost v tlaku. Byl odebrán také vzorek povrchové vrstvy sutí pro síťový rozbor. V oblasti je lokalizováno převažující pásmo biotitických rul s částečným zásahem pásma amfibolitů na přechodu mezi hrází nádrže a levým břehovým pásmem. Výsledky těchto laboratorních zkoušek jsou detailně rozebrány v kapitole 5 této práce.

Důležitá je zejména problematika porušování jednotlivých typů hornin, jelikož je rozdílná. Způsob porušení horninové hmoty totiž úzce souvisí s primárním minerálním složením a strukturou těchto hornin. U biotitických rul, které jsou tvořeny převážně horninotvornými minerály typu křemen, živce a biotit, je napětí soustředováno do ploch zón souhlasně orientovaných s plochami foliace, a proto u těchto hornin dochází k porušování zejména podél ploch foliace. Oproti tomu amfibolity, které mají také většinou strukturu plošně paralelní, mají v rámci minerálního složení větší zastoupení tmavých minerálů v celém objemu horninové hmoty. Tyto snáze podléhají zvětrávání a díky tomu k porušení hornin dochází jak podél ploch foliace, tak i puklinami napříč v důsledku napětí a zvětrání horninové hmoty.

Následně bylo provedeno modelování stabilitních výpočtů v Programu Plaxis 2D. Detailní výsledky stávajícího stavu a stavu po aplikaci stabilitních opatření jsou uvedeny v kapitole 6 této práce.

Nejdříve byl stabilitně posouzen stávající svah s maximální hladinou vody a poté při jejím snížení na minimální provozní úroveň. Ani v jednom případě svah není stabilní, což odpovídá skutečnému stavu. Za zmínku stojí skutečnost, že vlivem zatížení vody vychází lépe stav s maximální hladinou, jelikož voda působí jako přitížení svahu. Stupeň stability pro svah s maximální hladinou je 0,9937 a následně jeho hodnota klesá na 0,9352 při snížení na minimální provozní úroveň.

Z hlediska lokalizace smykové plochy se jedná o oblasti vrchní části svahu pod minimální hladinou vody pro situaci napuštění dolní nádrže na maximální hladinu a o oblasti spodní části svahu mezi minimální a maximální hladinou vody pro situaci hladiny vody na minimální provozní hladině.

Z hlediska čerpání pevnosti je pro svah kritická vrstva povrchové suti, kde je čerpání ve výši 100 %. Čerpání pevnosti pro horninový masiv je soustředováno v obou případech do paty svahu pod minimální provozní hladinou vody a opět pro situaci napuštění dolní nádrže na maximální hladinu vychází lépe.

Následně byl vytvořen návrh sanace a protierozních opatření, které byly taktéž stabilně posouzeny. Při návrhu bylo čerpáno z předchozí dobré zkušenosti s aplikací gabionových matrací na pravém břehu v těsné blízkosti hráze, která je na svahu stále aplikována a nedosahuje výrazných změn od své realizace před více než 20 lety. Dále bylo přihlédnuto k umístění stavby v CHKO Jeseníky, kdy je preferována konstrukce, která příliš nenarušuje okolní ráz přírodní krajiny. Pro realizaci sanačních a protierozních opatření bude nutné vypuštění vody z nádrže na 770,00 m n. m. (dno nádrže).

Návrh sanace spočívá ve vyčištění stávajícího dna nádrže od vyplavených jílových sedimentů, následně v odtěžení rozdrčené horninové suti spadané na dno nádrže a začištění stávajícího svahu horolezeckým způsobem od porušených a volných horninových bloků.

Návrh protierozních opatření je poté tvořen gabionovými konstrukcemi, které jsou ukotveny do začištěného horninového masivu. Prostor mezi konstrukcemi a horninovým masivem bude vyplněn vhodným zásypovým materiálem, který bude ideálně tvořen úlomky odtěženého horninového materiálu ze svahu a dna nádrže, které mají vyhovující pevnostní vlastnosti (viz výsledky laboratorních zkoušek v kapitole 5 této práce. Detailní popis protierozních opatření je uveden v kapitole 6.2 této práce. Pro strmou oblast svahu pod minimální hladinou vody (800,50 m n. m.) jsou aplikovány gabionové konstrukce typu Terramesh system a pro oblast svahu mezi minimální a maximální hladinou jsou aplikovány gabionové konstrukce typu Reno matrace. Oba typy konstrukcí vychází z produktů společnosti Maccaferri.

Modelování sanačních a protierozních opatření je detailně uvedeno a zhodnoceno v kapitole 6.2 této práce. Zde bych zdůraznila stabilitní posouzení aplikovaných opatření, kdy následně svah nabývá stupně stability ve výši 1,264. Při kolísání hladiny vody v nádrži poté vzroste na 1,572 při napuštění na maximální hladinu a klesne na 1,072 při vypuštění na minimální hladinu. Stupeň stability 1,072 nepovažuji za vyhovující z dlouhodobého hlediska kolísání hladiny. Ovšem domnívám se, že skutečný stupeň stability svahu při aplikaci

navrhovaných opatření je vyšší, z důvodu nutnosti značného zjednodušení modelu. Dále se domnívám, že dosažení přesnějších výsledků posouzení navrhované konstrukce by bylo výhodné využít některý z programů společnosti Maccaferri.

Z hlediska lokalizace smykové plochy při kolísání vody v nádrži s aplikovanou ochrannou konstrukcí mluvíme o oblasti vrchní části svahu mezi minimální a maximální hladinou vody, kdy s vypuštěním nádrže na minimální hladinu dojde s přesunu kritické smykové plochy pod konec gabionových matrací v těsné blízkosti původní maximální hladiny.

Z hlediska čerpání pevnosti při kolísání vody v nádrži s aplikovanou ochrannou konstrukcí je pro svah kritická zbytková vrstva povrchové suti, kde je čerpání ve výši 100 %. Čerpání pevnosti pro horninový masiv je soustředováno v obou případech do paty svahu pod minimální provozní hladinou vody a opět pro situaci napuštění dolní nádrže na maximální hladinu vychází lépe. Vzhledem k těmto výsledkům bych zpětně doporučila úplné odstranění povrchové části suti, a to i ze svahu nad minimální hladinou vody (800,50 m n. m.), kde jsem v návrhu uvažovala pouze její dosypání zásypovým materiálem před aplikací gabionových matrací. K tomuto kroku bych přistoupila zejména kvůli výrazné rozdílnosti mezi velikostmi jednotlivých úlomků horninového masivu.

Dále bych ještě zmínila problematiku nepravidelného zatěžování svahů. V práci uvádím denní charakter kolísání hladiny vody v nádrži mezi minimální a maximální hladinou a dosažené maximální rozmezí 22,2 m dále přebírám jako nejhorší možný stav pro tvorbu modelových situací. Ovšem skutečná situace při běžném provozu je poněkud odlišná. Skutečně napuštěná úroveň hladiny vody v nádrži mezi uváděnou minimální provozní a maximální hladinou kolísá den ode dne v závislosti na aktuální energetické situaci v celé České republice. Vzhledem k tomu jsou svahy dolní nádrže dále podrobovány také nepravidelnému zatěžování, což jejich již narušené stabilitě nijak neprospívá.

Za problematické považuji určení stávajícího stavu horninového masivu pod minimální hladinou vody ve výšce 800,50 m n. m., jelikož voda dosud nebyla vypuštěna na nižší hladinu, a to od spuštění PVE v roce 1996. Jeho stav tak může být horší, než je předpokládáno a bude nutné návrh operativně pozměnit.

Ovšem celkově považuji navrhované způsoby sanace a protierozních opatření za výhodné a efektivní v dané situaci, jak pro kolísání hladiny vody v nádrži, tak pro přítomnost náročných klimatických poměrů. Jak je ověřeno sledováním zajištěné části pravého břehu v těsné blízkosti hráze, je 20 let stará konstrukce gabionových matrací stále stabilní a svah je chráněn před výrazným postupem eroze a sesuvy horninového materiálu do tělesa nádrže.

Z hlediska části svahu zajištěných gabionovou konstrukcí typu Terramesh system bych doporučila periodický potápěčský průzkum, zda nebude docházet k výraznějším deformacím této konstrukce.

Zahájení vypouštění nádrže z úrovně minimální provozní hladiny (800,50 m n. m.) je předběžně stanoveno na 9. 7. 2018 s dosažením plného vypouštění na dno nádrže (700,00 m n. m.) dne 13. 7. 2018. Poté budou provedeny navržené sanační a protierozní opatření se zahájením napouštění dolní nádrže na minimální provozní hladinu dne 27. 8. 2018. Po dobu provádění sanačních a protierozních opatření bude PVE Dlouhé Stráně mimo provoz.

Seznam použitých pramenů

Odborná literatura

- [1] *Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně: historie a výstavba*. 2. vyd. Česká republika: Energotis, 1998.
- [2] CHLUPÁČ, Ivo a kol. *Geologická minulost České Republiky*. 1. vyd. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-0914-0.
- [3] KRÁSNÝ, Jiří. *Podzemní vody České republiky: Regionální hydrogeologie prostých a minerálních vod*. Praha: Česká geologická služba, 2012. ISBN 978-80-7075-797-0.
- [4] MÍSAŘ, Zdeněk a kol. *Geologie ČSSR I. Český Masív: celostátní vysokoškolská učebnice pro studující přírodovědeckých fakult studijního oboru geochemie a základní a ložisková geologie*. Ilustroval Štěpán NOVÁK. 1. vyd. Praha: SPN, 1983.
- [5] QUITT, Evžen. *Klimatické oblasti Československa*. Brno: Geografický ústav ČSAV, 1971. Studia Geographica, Svazek 16.

Internetové zdroje

- [6] *Mapy.cz* [online]. Seznam.cz, a.s., © 1996 – 2017. [Cit. 14. 9. 2017]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=17.2083064&y=50.0770104&z=13&l=0&source=basb&id=1712916&q=dlouh%C3%A9%20str%C3%A1n%C4%9B>
- [7] *Správa CHKO Jeseníky* [online]. AOPK ČR, © 2017. [Cit. 18. 9. 2017]. Dostupné z: <http://jeseniky.ochranaprirody.cz/charakteristika-CHKO/>
- [8] *Institut geologického inženýrství* [online]. VŠB-TU Ostrava HGF, © 2017. [Cit. 22. 9. 2017]. Dostupné z: http://geologie.vsb.cz/reg_geol_cr/6_kapitola.htm
- [9] *Česká geologická služba* [online]. Česká geologická služba, © 2017. [Cit. 31. 5. 2017]. Dostupné z: http://mapy.geology.cz/geocr_50/

- [10] *Geologická encyklopedie On-line* [online]. Česká geologická služba, © 2007. [Cit. 19. 11. 2017]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/aplikace/encyklopedie/term.pl?t=9>
- [11] *Geoportál ČÚZK* [online]. Zeměměřičský úřad, © 2010. [Cit. 13. 11. 2017]. Dostupné z: http://ags.cuzk.cz/dmr/#wpro_simplechart

Jiné zdroje

- [12] *4. souhrnná etapová zpráva o technickobezpečnostním dohledu za období 8/2010 – 7/2015*. Vodní díla – TBD a.s., Brno. Ing. Milan Singer, září 2015.
- [13] *Zpráva o změnách břehového pásma dolní nádrže přečerpávací vodní elektrárny Dlouhé Stráně*. Vodní díla – TBD a.s., Brno. Ing. Jan Fousek, září 2015.
- [14] *Odborná zpráva – Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně, břehové pásmo dolní nádrže: Kritická analýza současného stavu*. SG-Geoinženýring s.r.o., Ostrava. Ing. Jiří Hájovský, CSc., červenec 2011.
- [15] *Odborný posudek – Aktuální stav břehového pásma dolní nádrže EDS*. SG-Geoinženýring s.r.o., Ostrava. Ing. Jiří Hájovský, CSc. a Ing. Jiří Drahoňovský, červenec 2011.
- [16] *Vývoj MEMS pro monitoring nestability zemních těles – Etapa I: Kritická analýza současných příčin nestability zemních těles a skalních útvarů, definice rizik při ztrátě jejich stability a způsoby monitoringu*. SG-Geoinženýring s.r.o., Ostrava. Ing. Jiří Hájovský, CSc., listopad 2017.

Normy

- [17] ČSN EN 13755 (721149). *Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení nasákavosti vodou za atmosférického tlaku*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

- [18] ČSN EN 12371 (721147). *Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení mrazuvzdornosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [19] ČSN EN 1926 (721142). *Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení pevnosti v prostém tlaku*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [20] ČSN EN 933-1 (721193). *Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [21] ČSN EN ISO 14688-1 (721003). *Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zařizování zemin – Část 1: Pojmenování a popis*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [22] ČSN EN ISO 14688-2 (721003). *Geotechnický průzkum a zkoušení – Pojmenování a zařizování zemin – Část 2: Zásady pro zařizování*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [23] ČSN 73 1001 (731001). *Zakládání staveb. Základová půda pod plošnými základy*. Zrušena k 1. 4. 2010.
- [24] ČSN EN 1997-1 (731000). *Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 1: Obecná pravidla*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [25] ČSN EN 1997-2 (731000). *Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí – Část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

Elektronické zdroje

- [26] *Maccaferri - Engineering for better solution* [CD-ROM]. Bratislava: Maccaferri, 2015.

Seznam fotografií

Foto 4.1: Pohled na oba břehy dolní nádrže z hráze [Foto autora]	30
Foto 4.2: Velikosti úlomků tvořících svahy břehových pásem [Foto autora]	32
Foto 4.3: Velikosti úlomků tvořících svahy břehových pásem [Foto autora]	32
Foto 4.4: Velikosti úlomků tvořících svahy břehových pásem [Foto autora]	32
Foto 4.5: Velikosti úlomků tvořících svahy břehových pásem [Foto autora]	33
Foto 4.6: Pohled na zajištění úseku pravého břehu gabionovými matracemi [Foto autora]	33
Foto 4.7: Detail napojení gabionových matic na hráz dolní nádrže [Foto autora]	34
Foto 4.8: Detail deformace a zanesení gabionové matrace [Foto autora]	34
Foto 4.9: Pohled na celý pravý břeh dolní nádrže z hráze [Foto autora]	35
Foto 4.10: Detail svahu pravého břehu nejbliže hrázi [Foto autora]	35
Foto 4.11: Detail svahu střední části pravého břehu blíže k hrázi [Foto autora]	36
Foto 4.12: Detail svahu střední části pravého břehu blíže k zátopové oblasti [Foto autora] ...	36
Foto 4.13: Detail svahu pravého břehu nejbliže zátopové oblasti [Foto autora]	36
Foto 4.14: Stabilizační opatření v levé části za sdruženým objektem [Foto autora]	37
Foto 4.15: Pozůstatky konstrukce v pravé části za sdruženým objektem [Foto autora]	38
Foto 4.16: Betonový blok za sdruženým objektem ve svahu levého břehu [Foto autora]	38
Foto 4.17: Napojení betonového bloku na pravou část levého břehu [Foto autora]	39
Foto 4.18: Pohled na celý levý břeh dolní nádrže ze začátku pravého břehu [Foto autora]	39
Foto 4.19: Oblast levého břehu směrem od konce zátopové oblasti [Foto autora]	40
Foto 4.20: Oblast zálivu v levém úseku za sdruženým objektem [Foto autora]	41
Foto 4.21: Levý úsek svahu za sdruženým objektem s opatřením [Foto autora]	41
Foto 4.22: Oblast svahu v těsné blízkosti napojení spojovacího mostu [Foto autora]	42
Foto 4.23: Pravý úsek svahu za sdruženým objektem s betonovým blokem [Foto autora]	42
Foto 4.24: Oblast levého břehu od sdruženého objektu k hrázi [Foto autora]	42
Foto 5.25: Vzorek 1 [Foto autora]	44
Foto 5.26: Vzorek 2 [Foto autora]	44
Foto 5.27: Vzorek 3 [Foto autora]	45
Foto 5.28: Vzorek 4 [Foto autora]	45
Foto 5.29: Vzorek 5 [Foto autora]	45
Foto 5.30: Vzorek 6 [Foto autora]	45
Foto 5.31: Vzorek 7 [Foto autora]	45
Foto 5.32: Vzorek 8 [Foto autora]	45

Foto 5.33: Vzorek 9 [Foto autora].....	45
Foto 5.34: Vzorek 10 [Foto autora].....	45
Foto 5.35: Vzorek 11 [Foto autora].....	46
Foto 5.36: Vzorek 12 [Foto autora].....	46
Foto 5.37: Vzorek 13 [Foto autora].....	46
Foto 5.38: Vzorek 14 [Foto autora].....	46
Foto 5.39: Vzorek 15 [Foto autora].....	46
Foto 5.40: Vzorek 16 [Foto autora].....	46
Foto 5.41: Nařezané vzorky biotitové ruly a amfibolitu [Foto autora]	48
Foto 5.42: Vzorky pod hladinou vody pro stanovení jejich nasákavosti [Foto autora]	48
Foto 5.43: Čidlo pro monitorování teploty umístěné ve vzorku 2.3 [Foto autora]	51
Foto 5.44: Mrazící box [Foto autora]	51
Foto 5.45: Vzorky v mrazícím boxu [Foto autora]	52
Foto 5.46: Vzorek biotitové ruly po vytáhnutí z lisu [Foto autora]	58
Foto 5.47: Porušená struktura vzorku biotitové ruly [Foto autora]	58
Foto 5.48: Vzorek amfibolitu po vytáhnutí z lisu [Foto autora]	58
Foto 5.49: Porušená struktura vzorku amfibolitu [Foto autora]	58
Foto 5.50: Vzorek povrchové suti pro síťový rozbor [Foto autora].....	59

Seznam grafů

Graf 5.1: Pevnosti vzorků biotitové ruly v prostém tlaku	56
Graf 5.2: Pevnosti vzorků amfibolitu v prostém tlaku	56
Graf 5.3: Křivka zrnitosti odebraného vzorku povrchové suti	60
Graf 6.4: Vývoj stupňů stability při aplikaci stabilizačních opatření	72

Seznam obrázků

Obr. 3.1: Situace umístění PVE Dlouhé Stráně [6]	14
Obr. 3.2: Schéma geologického profilu pohoří Hrubý Jeseník [2]	17
Obr. 3.3: Geologická mapa lokality PVE Dlouhé Stráně [9]	18
Obr. 3.4: Naměřené hodnoty modulů pružnosti a deformace [1]	20
Obr. 4.5: Vzorový příčný řez hrází dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně [1]	26
Obr. 4.6: Finální podoba dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně po uvedení do provozu [1]	27
Obr. 4.7: Betonáž sdruženého objektu v dolní nádrži PVE Dlouhé Stráně při výstavbě [1] ...	28
Obr. 4.8: Úprava svahu za sdruženým objektem po jeho výstavbě [1]	28
Obr. 4.9: Umístění vlastních fotografií uváděných v práci	31
Obr. 5.10: Nastavení zkoušky mrazuvzdornosti	53
Obr. 5.11: Průběh zkoušky mrazuvzdornosti v jednom cyklu (12 hodin)	53
Obr. 6.12: Modelovaný řez svahem levého břehového pásma s rozsahem opatření [11]	61
Obr. 6.13: Schéma stávajícího stavu řešené části svahu	62
Obr. 6.14: Situace 1 stávajícího stavu	63
Obr. 6.15: Situace 2 stávajícího stavu	63
Obr. 6.16: Smyková plocha pro situaci 1	64
Obr. 6.17: Smyková plocha pro situaci 2	65
Obr. 6.18: Čerpání pevnosti pro situaci 1	65
Obr. 6.19: Čerpání pevnosti pro situaci 2	65
Obr. 6.20: Totální napětí pro situaci 1 ve směru osy x	66
Obr. 6.21: Totální napětí pro situaci 1 ve směru osy y	66
Obr. 6.22: Schéma stabilizačního opatření řešené části svahu	68
Obr. 6.23: Terramesh system (výrobce Maccaferri) [26]	69
Obr. 6.24: Reno matrace (výrobce Maccaferri) [26]	69
Obr. 6.25: Situace 3 aplikace stabilizačních opatření	71
Obr. 6.26: Smyková plocha pro situaci 1	73
Obr. 6.27: Smyková plocha pro situaci 2	74
Obr. 6.28: Smyková plocha pro situaci 3	74
Obr. 6.29: Smyková plocha pro situaci 4	74
Obr. 6.30: Smyková plocha pro situaci 5	75
Obr. 6.31: Čerpání pevnosti pro situaci 1	75
Obr. 6.32: Čerpání pevnosti pro situaci 2	76

Obr. 6.33: Čerpání pevnosti pro situaci 3.....	76
Obr. 6.34: Čerpání pevnosti pro situaci 4.....	77
Obr. 6.35: Čerpání pevnosti pro situaci 5.....	77
Obr. 6.36: Totální napětí pro situaci 3 ve směru osy x	78
Obr. 6.37: Totální napětí pro situaci 3 ve směru osy y	78
Obr. 6.38: Totální napětí pro situaci 4 ve směru osy x	78
Obr. 6.39: Totální napětí pro situaci 4 ve směru osy y	79

Seznam tabulek

Tab. 3.1: Klimatické charakteristiky dle Quitta [5].....	24
Tab. 4.2: Vybrané technické parametry dolní nádrže PVE Dlouhé Stráně [1]	25
Tab. 5.3: Popis a zařazení odebraných vzorků hornin	47
Tab. 5.4: Měření nasákavosti vzorků vodou za atmosférického tlaku	50
Tab. 5.5: Vzorky podrobené zkoušce mrazuvzdornosti	52
Tab. 5.6: Stupnice vizuální kontroly dle ČSN EN 12371 [18]	54
Tab. 5.7: Rozměry vzorků a měření pevnosti v prostém tlaku	56
Tab. 5.8: Výsledky síťového rozboru vzorku povrchové suti.....	59
Tab. 6.9: Parametry hornin pro stávající stav modelu svahu	63
Tab. 6.10: Srovnání výsledků situací stávajícího stavu	64
Tab. 6.11: Navrhované rozměry gabionových konstrukcí (výrobce Maccaferri) [26]	69
Tab. 6.12: Parametry konstrukcí pro stabilizní opatření modelu svahu	70
Tab. 6.13: Parametry přidáných liniových prvků.....	71
Tab. 6.14: Srovnání výsledků situací při aplikaci stabilizního opatření	73